



Frederico Manuel dos Santos Atanásio

Licenciatura em Ciências da
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

**Mercados de Energia Elétrica:
Simulador Didático para Estudantes Universitários**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Doutor, Fernando Jorge Ferreira Lopes,
Laboratório Nacional de Energia e Geologia

Co-orientadora: Doutora, Anabela Monteiro Gonçalves Pronto,
Faculdade de Ciência e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutor João Almeida das Rosas

Arguentes: Doutor Helder Manuel Ferreira Coelho

Vogal: Doutor Fernando Jorge Ferreira Lopes



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Mercados de Energia Elétrica: Simulador Didático para Estudantes Universitários

Copyright © Frederico Manuel dos Santos Atanásio, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

À minha família

Agradecimentos

A realização da presente dissertação só foi possível com o apoio e incentivos sem os quais não teria sido possível a realização da presente dissertação e pelos quais estarei eternamente grato.

Ao Doutor Fernando Lopes que pela sua orientação, disponibilidade, recomendações e opiniões tornaram possível a elaboração da presente dissertação.

À Professora Anabela Pronto pela sua orientação, apoio e conhecimentos partilhados ao longo do meu percurso académico como minha professora, mas também pelo acompanhamento que foi feito ao longo do desenvolvimento da presente dissertação e sobretudo pela oportunidade que me foi dada.

Ao Engenheiro Hugo Algarvio do Laboratório Nacional de Energia e Geologia por ter ajudado nos momentos em que havia mais dúvidas que certezas e pela partilha de conhecimento que ajudou a construir todo este trabalho.

Aos meus amigos, David Crispim, Diogo Alves, Inês Martins, Miguel João, Teresa Pereira, Pedro Afonso e João Agostinho. Alguns acompanharam-me desde o Ensino Secundário, outros desde o início do curso, mas que deram sempre muita força para ultrapassar todas as obstáculos que foram aparecendo.

À minha família, em especial aos meus pais, António e Graça, e irmã, Daniela, por todo o seu amor, carinho e apoio incondicional desde sempre, e por estarem sempre presentes quando mais preciso e por tudo o que fizeram por mim tornaram possível superar este último obstáculo da minha vida académica.

Por último a duas pessoas que já não se encontram presentes, mas que tiveram uma enorme importância ao longo da minha vida, a minha avó Brígida e o meu tio Zé.

Resumo

O sistema elétrico, como é conhecido atualmente, passou por grandes alterações ao longo do tempo. Inicialmente, este era constituído por redes elétricas de baixa potência e de curto alcance. Ao longo do século XX, as redes elétricas foram crescendo, nomeadamente o alcance das mesmas e a capacidade instalada, sendo que a sua gestão era feita através de uma única entidade detida pelo Estado. É já no final do século XX e início do século XXI, e tendo presente que a estrutura do sector elétrico apresentava limitações, que diversos países, levaram a cabo um processo de liberalização do sector, que permitiu o desenvolvimento de mercados competitivos.

Neste contexto, é expectável que as universidades apresentem aos estudantes do curso de Engenharia Eletrotécnica, e não só, uma disciplina de Mercados de Energia Elétrica (MEE). Sabendo que já existem diversas ferramentas que procuram replicar os resultados dos diversos MEE, estas apresentam algumas limitações para a utilização por parte dos estudantes, nomeadamente a elevada complexidade e o difícil acesso e de utilização por parte dos estudantes. Como tal, a presente dissertação tem como principal objetivo desenvolver uma ferramenta de apoio simples e de fácil utilização por parte dos estudantes do ensino superior, nomeadamente numa disciplina de Mercados de Energia, que permita simular os principais tipos de mercados de energia existentes, tornando-se num auxiliar importante às aulas.

Para tal, fazendo uso de sistemas multi-agente e da linguagem de programação Java, e tendo como base o sistema MATREM, foi desenvolvido um simulador didático, constituído por quatro módulos, que permitem simular os mercados diário, de futuros, de reservas e bilateral. No sentido de facilitar a aprendizagem do funcionamento dos diversos mercados, foram implementados vários casos de estudo.

Palavras-chave: Mercados de Energia Elétrica, Sistemas Multi-Agente, Mercado Diário, Mercado de Reservas, Mercado de Futuros, Mercados de Contratos Bilaterais, Sistema MATREM.

Abstract

The electrical system has undergone major changes over time. Initially, the electricity sector consisted of low-power, short-range power grids. Throughout the twentieth century, the power grids were growing, namely their range and installed capacity, but their management was typically made by a single state-owned entity. It's only at the end of the twentieth century and the beginning of the twenty-first century, and knowing that the structure of the electricity sector had limitations, that several countries, carried out a process of liberalization of the sector, which allowed the development of competitive markets.

Bearing in mind this context, it is expected that the Universities present to the students of Electrical Engineering, and possibly other students, a discipline of Electrical Energy Markets. Knowing that there're already several tools that replicate the results of different Electric Energy Markets, these include some difficulties for the use of students, namely the complexity and difficulty of access and use by the students. As such, this dissertation has as its main objective the development of a support tool for higher education, namely for a discipline Energy Markets, which allows to simulate the main types of existing markets, becoming an important aid to the practical classes.

Accordingly, using multi-agent systems and the Java programming language, and taking the MATREM system as a basis, a didactic simulator was developed, consisting of four modules, which allow to simulate the daily, futures, reserves and bilateral markets. In order to facilitate learning about the operation of the various markets, several case studies have been implemented.

Keywords: Electricity Market, Multi-Agent Systems, Day-Ahead Market, Reserve Markets, Future Market, Bilateral Contracts Market, MATREM System.

Índice

Lista de Figuras	xvii
Lista de Tabelas	xix
Glossário	xxi
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento e Motivações.....	2
1.2 Principais objetivos	3
1.3 Contribuições	4
1.4 Estrutura da Dissertação.....	4
2 Mercados de Energia Elétrica.....	5
2.1 Modelos de Mercados de Energia Elétrica	6
2.1.1 Mercado em Bolsa.....	6
2.1.2 Mercado de Contratos Bilaterais.....	7
2.1.3 Mercado Misto.....	10
2.1.4 Mercado de Serviços de Sistema.....	11
2.2 Mercado Ibérico de Eletricidade.....	15
2.2.1 Mercado Diário.....	16
2.2.2 Mercado Intradiário.....	17
2.2.3 Mercado a Prazo.....	18
3 Sistemas Multi-Agente e Agentes Computacionais Autónomos	21
3.1 Sistemas Multi-Agente	22
3.1.1 Agentes Computacionais Autónomos	22

3.1.2	<i>Plataformas Computacionais para Sistemas Multi-Agente</i>	24
3.2	Simuladores Multi-Agente de Mercados de Energia Elétrica	25
3.2.1	<i>Electric Market Complex Adaptive System (EMCAS)</i>	25
3.2.2	<i>Multi-Agent Simulator for Competitive Electricity Markets (MASCEM)</i>	26
3.2.3	<i>Multi-Agent Trading in Electricity Markets (MATREM)</i>	26
4	Módulo do Mercado Diário	33
4.1	Interface gráfica	34
4.1.1	<i>Menu Ficheiros (File)</i>	35
4.1.2	<i>Menu Participantes (Participants)</i>	36
4.1.3	<i>Menu Simulação (Simulation)</i>	37
4.1.4	<i>Menu Casos de Estudo (Case Studies)</i>	38
5	Módulo do Mercado de Reservas	43
5.1	Interface gráfica	44
5.1.1	<i>Menu Ficheiros (File)</i>	45
5.1.2	<i>Menu Participantes (Participants)</i>	46
5.1.3	<i>Menu Simulação (Simulation)</i>	48
5.1.4	<i>Menu Casos de Estudo (Case Studies)</i>	52
6	Módulo do Mercado de Futuros	57
6.1	Interface gráfica	58
6.1.1	<i>Menu Ficheiros (File)</i>	59
6.1.2	<i>Menu Participantes (Participants)</i>	60
6.1.3	<i>Menu Simulação (Simulation)</i>	60
6.1.4	<i>Botão Caso de Estudo (Case Study)</i>	65
7	Módulo do Mercado Bilateral	69
7.1	Interface gráfica	70
7.1.1	<i>Menu Ficheiros (File)</i>	71
7.1.2	<i>Menu Agentes (Agents)</i>	72
7.1.3	<i>Menu Simulação (Simulation)</i>	72
7.1.4	<i>Botão Caso de Estudo (Case Study)</i>	77
8	Conclusões e Trabalho Futuro	81
8.1	Síntese de Resultados	82
8.2	Trabalho Futuro	83

Referências	85
Anexo A	91
Anexo B	93
Anexo C	97
Anexo D	101

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Modelo misto de exploração do sector elétrico [1].....	11
Figura 2.2 – Estrutura de negociação de energia no MIBEL [25]	15
Figura 2.3 – Modelo de oferta e de procura para o mercado diário [34]	16
Figura 3.1 – Funcionamento da versão utilizada neste trabalho do simulador MATREM [50]	28
Figura 3.2 – Organização e interação entre os agentes de mercado do MATREM [3] ..	29
Figura 3.3 – Ilustração da interface gráfica do simulador MATREM.....	31
Figura 4.1 – Ilustração da interface gráfica do módulo de mercado diário	34
Figura 4.2 – Janela de seleção de ficheiro para guardar/carregar ficheiros.....	35
Figura 4.3 – Janelas de introdução de dados para a criação de novos participantes	36
Figura 4.4 – Janela de seleção de participante a editar	37
Figura 4.5 – Janela para a seleção de participantes para remover.....	37
Figura 4.6 – Janela de seleção de participantes no mercado	38
Figura 4.7 – Janela de apresentação de resultados	38
Figura 4.8 – Janelas de introdução ao caso de estudo.....	39
Figura 5.1 – Ilustração da interface gráfica do módulo de mercado de reservas	44
Figura 5.2 – Janela de definição de nome do participante.....	46
Figura 5.3 – Janela de introdução, edição e remoção de centrais do participante	47
Figura 5.4 – Janelas de introdução dos dados para a criação de novas unidades.....	47
Figura 5.5 – Janela de seleção das centrais a participarem no mercado	48
Figura 5.6 – Janela de definição das ofertas da banda de regulação de uma central	49

Figura 5.7 – Janela de resultados do MRS	49
Figura 5.8 – Janela de apresentação de resultados dos participantes do MRS	50
Figura 5.9 – Janela de resultados do MRT	50
Figura 5.10 – Janela de apresentação de resultados dos participantes do MRT	51
Figura 6.1 – Ilustração da interface gráfica do módulo de mercado de futuros	58
Figura 6.2 – Janela com as ofertas criadas pelos participantes	60
Figura 6.3 – Janelas para a criação de uma oferta.....	61
Figura 6.4 – Quadro do mercado de futuros, onde são exibidas todas as ofertas	62
Figura 6.5 – Janelas com os detalhes de um contrato	63
Figura 6.6 – Janela de exibição dos contratos celebrados	64
Figura 6.7 – Janela com o gráfico com os valores de referência	64
Figura 6.8 – Janela com os valores de compensação entre os participantes	65
Figura 7.1 – Ilustração da interface gráfica do módulo de mercado bilateral	70
Figura 7.2 – Janelas de definição dos parâmetros dos agentes	73
Figura 7.3 – Janela de definição do horário de entrega de energia	73
Figura 7.4 – Janela de definição da data limite de cada agente.....	73
Figura 7.5 – Janela de definição do tipo de contrato e duração do mesmo	74
Figura 7.6 – Janelas de negociação dos agentes.....	74
Figura 7.7 – Janela definição do perfil de carga do agente comprador	75
Figura 7.8 – Janela de definição da estratégia a usar na negociação	76
Figura 7.9 – Janela de definição de contraofertas	76
Figura 7.10 – Janelas com os dados de um contrato	77

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Principais capacidades e características dos simuladores.....	30
Tabela 4.1 – Impacto da geração eólica no preço de mercado.....	40
Tabela 4.2 – Efeito da ordem de mérito nos preços.....	41
Tabela 4.3 – Preços de mercado no Cenário A e Cenário B	42
Tabela 5.1 – Participantes “fixos” presentes no caso de estudo.....	53
Tabela 5.2 – Resultados do caso de estudo	53
Tabela 5.3 – Participantes “fixos” presentes no caso de estudo.....	54
Tabela 5.4 – Resultados do mercado com os participantes “fixos”	54
Tabela 6.1 – Ganhos dos contratos de futuros.....	66
Tabela 7.1 – Dados dos limites de preços e volumes da biblioteca da FCT	78
Tabela 7.2 – Dados dos limites de preços do fornecedor de energia	78
Tabela 7.3 – Comparação das tarifas atuais e obtidas no MMB	79
Tabela 7.4 – Comparação dos custos atuais com os custos obtidas no MMB	79
Tabela A.1 – Resultados obtidos nos cenários C e D	91
Tabela B.1 – Dados das centrais do participante EDP.....	93
Tabela B.2 – Dados das centrais do participante EDP.....	94
Tabela B.3 – Dados das centrais do participante EDP.....	94
Tabela B.4 – Necessidades do sistema	95
Tabela B.5 – Resultados do mercado sem os participantes “fixos”	95
Tabela C.1 – Dados das centrais do participante EDP.....	97

Tabela C.2 – Dados das centrais do participante EDP.....	98
Tabela C.3 – Necessidades do sistema	98
Tabela C.4 – Resultados do mercado sem os participantes “fixos”	99
Tabela D.1 – Resultados da simulação de um novo contrato bilateral	101

Glossário

EMCAS	<i>Electric Market Complex Adaptive System</i>
ENTSO-E	<i>European Network of Transmission System Operators for Electric-</i> <i>ity</i>
FIPA	<i>Foundation for Intelligent Physical Agents</i>
GGs	Gestor Global de Sistema
JADE	<i>Java Agent Development Framework</i>
LMP	<i>Locational Marginal Pricing</i>
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
MAN-REM	<i>Multi-agent Negotiation and Risk Management in Electricity Mar-</i> <i>kets</i>
MASCEM	<i>Multi-agent Simulator for Competitive Electricity Markets</i>
MATREM	<i>Multi-Agent Trading in Electricity Markets</i>
MEE	Mercado de Energia Elétrica
MIBEL	Mercado Ibérico de Eletricidade
MMB	Módulo do Mercado Bilateral
MMD	Módulo do Mercado Diário
MMF	Módulo do Mercado de Futuros
MMR	Módulo do Mercado de Reservas
MRS	Mercado de Reservas Secundário
MRT	Mercado de Reservas Terciário
OAA	<i>Open Agent Architecture</i>

OM	Operador de Mercado
OMI	Operador de Mercado Ibérico
OMIE	OMI, Polo Español S.A.
OMIP	Operador do Mercado Ibérico de Energia (Pólo Português), S. A
OS	Operador de Sistema
OTC	<i>Over-The-Counter</i>
PRN	Preço de Referência de Negociação
PRS	Preço de Referência <i>Spot</i>
REN	Redes Energéticas Nacionais, SGPS, S.A.
REPAST	<i>Recursive Porous Agent Simulation Toolkit</i>
SEN	Sistema Elétrico Nacional
SMA	Sistema Multi-Agente
SMP	<i>System Marginal Pricing</i>
UDN	Último Dia de Negociação
VLE	Valor de Liquidação na Entrega



1 Introdução

Este capítulo efetua o enquadramento da dissertação, abordando os mercados de energia elétrica e os sistemas multi-agente. Ao longo do capítulo também são apresentados os objetivos propostos, as contribuições do estudo e, por último, a estrutura global da dissertação.

1.1 Enquadramento e Motivações

Ao longo das últimas décadas, o desenvolvimento promovido pelos grandes polos económico-sociais, aliados a vários acontecimentos marcantes a nível político e social, levaram a uma profunda evolução do sector elétrico. Inicialmente, constituído por pequenas redes elétricas de baixa potência, o sector elétrico evoluiu para redes de maior alcance e com maiores cargas instaladas, o que levou a efetuar reformas no mercado de energia, no sentido de abandonar práticas e conceitos pouco eficientes e obsoletos [1].

O sector elétrico assume um papel de extrema importância na economia mundial, o que fez com a sua reorganização fosse um processo complexo, uma vez que este possui características e regras distintas dos restantes mercados.

Antes da reestruturação, o sector elétrico era considerado um monopólio natural, em que as principais atividades do sector, nomeadamente a produção, transporte, distribuição e comercialização eram integradas numa única identidade, sendo detida por entidades estatais. Sendo uma área em que era efetuada uma gestão vertical, essas entidades acabavam por não ter qualquer tipo de concorrência, o que se traduzia numa prestação de serviços longe da ótima e maiores custos para o utilizador.

A partir dos anos 80, começou a surgir uma maior consciencialização de que o modelo em vigor era desadequado, tendo em conta as metas estabelecidas pelos diversos países, aliado a uma maior sensibilização e preocupação quanto às questões ambientais. Estas preocupações lançaram um debate a nível mundial em torno de uma possível liberalização, privatização e reestruturação do sector. O sector elétrico acabou por ser dividido em quatro áreas distintas, sendo que as áreas de produção e comercialização foram liberalizadas, enquanto que as áreas de transporte e distribuição mantêm o monopólio devido às suas características [2, 3].

Acaba por ser durante a década de 90, e seguindo Diretivas da Comissão Europeia, que o Governo Português definiu objetivos para o sector de energia elétrica, nomeadamente aumentar a preocupação ambiental, promover a competitividade e aumentar as fontes de produção de energia. Acabou por ser através destes esforços que os Governos de Portugal e Espanha desencadearam a criação de um mercado comum, o Mercado Ibérico de Eletricidade (MIBEL).

A liberalização do sector elétrico em Portugal provocou um aumento do número de empresas participantes na produção e comercialização, permitindo que todos os consumidores tenham a possibilidade de escolher o seu comercializador de energia elétrica.

Com o desenvolvimento dos mercados liberalizados de energia e o consequente aumento de participantes, a complexidade do mercado aumentou consideravelmente. Por outro lado, os mercados de energia são hoje uma realidade na maioria dos países Europeus

e Mundiais (salienta-se o MIBEL, o mercado do Norte da Europa, designado *NordPool*, e vários mercados Americanos, como o *NYISO*, referente a Nova Iorque, e o *CAISO*, para a Califórnia). Neste contexto, é expectável que a maioria das Universidades tenha pelo menos uma disciplina destinada à análise e compreensão dos mercados de energia eléctrica. Para tal, são necessárias ferramentas que ajudem os estudantes a compreender a dinâmica presente nos diversos tipos de mercados, de simular os preços e os volumes de energia transacionados nos mesmos, e a entender os comportamentos e as decisões dos diversos participantes do mercado.

A necessidade de *software* capaz de simular o comportamento dos participantes no mercado motivou o uso dos sistemas multi-agente (SMA), onde os agentes computacionais são entidades autónomas e que possuem a capacidade de decisão e de aprendizagem, podendo assim recriar de uma forma realista o comportamento e interesses próprios, bem como as capacidades de comunicação e interação dos participantes do mercado [4].

Neste sentido, foi desenvolvido o sistema MATREM¹ [5, 6], no Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG). O sistema permite aos seus utilizadores realizar diversos tipos de simulações, sendo de realçar transações energéticas no mercado em bolsa [7, 8] e no mercado a prazo, bem como a negociação de contratos bilaterais flexíveis [9 – 11], e os ajustes no mercado de reservas [12].

1.2 Principais objetivos

Os principais objetivos da presente dissertação são os seguintes:

- Estudar o mercado diário, bilateral e de reservas, com particular incidência para o funcionamento do MIBEL;
- Estudar o funcionamento do simulador multi-agente MATREM (*Multi-Agent Trading in Electricity Markets*);
- Desenvolver a partir dos modelos de mercado presentes no MATREM quatro módulos didáticos de um simulador, e respetivas interfaces, direccionados ao uso por parte de estudantes universitários, permitindo aos mesmos simular o funcionamento dos mercados: diário, reservas, contratos padronizados de futuros e contratos bilaterais;
- Implementar vários casos de estudo nos vários módulos, que facilitem a aprendizagem do funcionamento do mercado, por parte dos estudantes.

¹ Simulador desenvolvido no âmbito do projeto MAN-REM (FCOMP-01-0124-FEDER-020397), financiado pelo FEDER através do programa COMPETE - Programa Operacional Temático Fatores de Competitividade e pela FCT- Fundação para a Ciência e Tecnologia.

1.3 Contribuições

As principais contribuições do trabalho desenvolvido no âmbito da presente dissertação são as seguintes:

- Implementação computacional de quatro módulos capazes de representar a dinâmica do mercado diário, mercado de reservas, mercado de futuros e mercado de contratos bilaterais;
- Desenvolvimento de interfaces gráficas para todos os módulos, com vista a facilitarem a sua utilização por parte dos utilizadores;
- Adoção de casos de estudo existentes no sistema MATREM e a sua implementação, de forma a facilitar a aprendizagem do funcionamento dos diversos mercados.

1.4 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em oito capítulos. No presente capítulo, é realizado uma contextualização do tema, sendo apresentados os objetivos, as contribuições e a organização de cada um dos restantes capítulos.

No segundo capítulo é feita uma breve descrição do MIBEL, nomeadamente a sua organização e funcionamento. Este capítulo permite abordar os três tipos de mercado que serviram de base ao desenvolvimento dos módulos que serão apresentados a partir do quarto capítulo.

O terceiro capítulo introduz os conceitos de agente computacional e SMA, destacando a área de simulação de MEE, onde são identificadas algumas plataformas computacionais já existentes, utilizadas para simular mercados de energia elétrica.

Do quarto ao sétimo capítulo, são apresentados os módulos: mercado diário, mercado de reservas, mercado de futuros e mercado bilateral. São apresentadas as interfaces gráficas, as funcionalidades de cada módulo e as suas especificações. As funcionalidades presentes em cada módulo são aplicadas na reprodução de casos de estudo desenvolvidos anteriormente com o intuito de confirmar os resultados obtidos e o bom funcionamento dos mesmos. De realçar, que apesar de todos os módulos terem como base o MATREM, apenas o módulo de contratos bilaterais faz uso da tecnologia SMA. Só usando os protocolos desenvolvidos nas tecnologias SMA se torna possível replicar os comportamentos, interesses e crenças dos diversos participantes, sendo fundamentais para o decorrer das negociações que ocorrem neste tipo de mercado.

No último capítulo são apresentadas as principais conclusões sobre o trabalho realizado e algumas propostas de desenvolvimento futuro no âmbito dos módulos desenvolvidos.

2 Mercados de Energia Elétrica

Tendo em conta o tema da presente dissertação, é pertinente contextualizar o panorama do sector elétrico nacional no seguimento da liberalização. Para tal, inicialmente encontram-se descritos de uma maneira sucinta alguns dos modelos de mercado existentes: o mercado em bolsa, o mercado de contratos bilaterais, o mercado misto e o mercado de serviços de sistemas. Por fim é apresentado o Mercado Ibérico de Eletricidade (MIBEL), destacando a sua organização, as suas principais especificidades e identificando os diversos mercados presentes no mesmo.

2.1 Modelos de Mercados de Energia Elétrica

O mercado de energia elétrica apresenta um conjunto de características bastantes particulares em comparação com outros mercados, justamente pelo bem transacionado, a energia elétrica.

Ao longo das próximas secções serão apresentadas as estruturas de quatro modelos de mercado: em bolsa, de contratos bilaterais, misto e de serviços de sistema.

2.1.1 Mercado em Bolsa

O modelo de mercado em bolsa de energia elétrica é baseado no modelo de mercado *spot* centralizado que permite aos produtores, comercializadores ou clientes elegíveis estabelecerem relações comerciais. Este tipo de mercado apresenta uma moderada volatilidade dos preços.

O funcionamento deste tipo de mercado baseia-se na interação entre agentes grossistas, retalhistas e consumidores finais, ao efetuarem propostas de compra e/ou venda de energia elétrica referentes ao dia seguinte, dia D, sendo implementado o resultado da negociação efetuada no dia D-1. Este tipo de mercado está associado a um curto espaço temporal, onde as propostas de venda refletem os custos marginais associados.

Os diferentes mercados bolsistas existentes estão estruturados de modo a acomodarem diferentes centrais de produção de energia, em que cada uma comporta um custo marginal diferente, bem como as diferentes cargas existentes durante o dia. Para conseguirem comportar os fatores referidos anteriormente e a dificuldade de prever a carga diária, para garantir o bom funcionamento deste tipo de mercado, o intervalo de tempo de um dia encontra-se dividido em 24 ou 48 intervalos de 1 hora ou 30 minutos, respetivamente.

O operador de mercado (OM) assume a responsabilidade de apuramento das propostas de forma a determinar qual é o despacho ótimo de energia elétrica para o período designado, assegurando assim o equilíbrio entre a produção, o consumo e a transparência das transações realizadas em mercado de bolsa.

As propostas de compra e venda de energia elétrica feitas pelos agentes autorizados a participar neste tipo de mercado são recebidas pelo OM e deverão ser iguais ao número de intervalos de tempo em que cada dia se encontra dividido. As propostas serão organizadas pelo OM por intervalo de tempo, ordenando as propostas de compra e venda por ordem de preço. Posteriormente, é determinado o preço de venda, que representa o valor que os agentes retalhistas e consumidores finais irão pagar aos agentes produtores, consoante o volume de energia adquirido.

De realçar que no mercado de bolsa, se os agentes vendedores licitarem valores muito elevados, estes não irão conseguir vender a energia produzida, uma vez que estes estão inseridos num mercado competitivo. Se os agentes consumidores efetuarem ofertas muito baixas, estes não irão conseguir adquirir a energia necessária para satisfazer as suas necessidades [13].

O modelo em bolsa tem duas variantes distintas:

- Modelo simétrico, em que o OM recebe as ofertas de compra e venda para cada intervalo de tempo do dia seguinte. Em função das propostas de compra mais vantajosas, e de venda mais económicas, é determinado o preço ao qual os compradores irão adquirir a energia e os vendedores a irão receber, existindo a ressalva de possível alteração de preço, caso existam congestionamentos na rede.
- Modelo assimétrico, em que o OM emite um despacho temporário com base na carga prevista e nas licitações feitas pelas empresas vendedoras. Estes serão renumerados com o preço determinado em função das ofertas mais económicas para cobrir a carga prevista. Mais uma vez, à semelhança do modelo simétrico, os preços estão sujeitos a alterações em caso de congestionamentos na rede.

Em ambiente de mercado de bolsa, o formato simétrico é o mais utilizado, pois garante aos agentes compradores e vendedores uma maior liberdade na submissão das respetivas ofertas de compra e venda de energia elétrica.

2.1.2 Mercado de Contratos Bilaterais

O modelo de contratos bilaterais é uma alternativa ao modelo de bolsa que surgiu com o intuito de dar resposta ao risco que caracterizam os mercados a curto prazo. Este modelo é assente na celebração de acordos entre duas entidades (geralmente uma entidade produtora e uma entidade consumidora), no princípio da livre concorrência e é regido pelas leis do mercado.

Este tipo de mercado surge com o objetivo de contrariar o risco associado aos mercados de curto prazo, que apresentam uma elevada volatilidade de preços, pois o preço negociado reflete os custos marginais a curto prazo.

Neste modelo de mercado, apesar de existir uma liberdade de negociação dos termos por parte dos agentes envolvidos, o contrato deve ser avaliado pelo operador de sistema (OS), para garantir que não existem violações de regras de mercado ou risco de congestionamento da rede. Caso exista alguma violação das restrições na rede, o contrato celebrado terá de ser ajustado de forma a salvaguardar o bom funcionamento da rede (defendendo, na medida do possível, os interesses das partes envolvidas) [14, 15].

É possível fazer-se a distinção de dois tipos de contratos bilaterais [16]:

- Os contratos bilaterais físicos, onde a entidade vendedora se responsabiliza por colocar a energia elétrica na rede e a entidade consumidora compromete-se a receber a energia elétrica contratada. Neste tipo de contrato, o preço e as condições contratuais são negociáveis até ao momento da entrega. Como o preço é fixo para um longo período, o preço fica salvaguardado da volatilidade de preços existentes nos mercados de bolsa.

- Os contratos bilaterais financeiros, que também fornecem segurança relativamente à variação de preços, pois contrariam as variações da oferta/procura. De forma a contrariar o risco inerente ao mercado, neste modelo pode-se considerar diferentes contratos, tais como os *forward*, futuros, opções ou por diferenças. Estes auferem aos agentes intervenientes uma maior segurança relativa ao risco que os mercados apresentam [16].

De seguida, encontram-se descritos dois dos tipos de opções financeiras utilizadas, os contratos padronizados e os contratos não padronizados, tendo em conta que cada um destes elementos representam uma solução viável de contratação relativamente ao mercado em bolsa.

2.1.2.1 Contratos Bilaterais Padronizados

No mercado organizado, os contratos transacionados são padronizados com características próprias. Os contratos padronizados têm quase todas as características pré-estabelecidas à partida, apenas é possível negociar o preço de venda/compra.

A negociação em mercado organizado é facilitada, pois através da padronização os custos da transação diminuem, logo existe um aumento da liquidez destes produtos, dando origem a uma melhor gestão de risco [17].

Os contratos padronizados podem ser divididos em três categorias distintas:

- Contratos de futuros – contrato padronizado (volume nominal e notação de preço) de compra ou venda de energia para um certo período de tempo, em que o agente comprador se compromete a adquirir energia elétrica no período de entrega, e o agente vendedor se compromete a colocar essa mesma energia elétrica, ao preço acordado no momento da transação. Este contrato tem ajustes diários entre o preço de venda e a cotação do mercado em bolsa. Os agentes compradores e vendedores não se relacionam diretamente entre si, cabendo à câmara de compensação² a responsabilidade de liquidar as margens diárias e o contrato na data ou período de entrega [18].

- Contratos *forward* – contrato semelhante ao contrato de futuros, mas sem liquidações diárias das margens durante o período de negociação, sendo a margem liquidada integralmente nos dias de entrega física ou financeira. Mais uma vez os agentes não se relacionam diretamente entre si, cabendo à câmara de compensação a responsabilidade de liquidar as margens diárias e o contrato na data ou período de entrega [18].

² Entidade que garante o cumprimento dos contratos estabelecidos entre os seus contraentes.

- Contratos *swap* ou por diferenças – neste tipo de contrato, os participantes chegam a acordo em relação ao preço, em vez de uma quantidade de energia. A liquidação deste tipo de contrato é feita tendo em conta o preço de mercado. Se o preço acordado entre os agentes for superior ao preço de mercado, o comprador paga ao vendedor o valor da diferença. Caso contrário, o vendedor paga ao comprador a diferença de valores [18].

Os contratos padronizados oferecem às diferentes entidades a possibilidade de terem custos estáveis ao longo do ano, podendo fazer uma previsão dos custos, e tendo assim um mecanismo que protege os investimentos em caso de um aumento dos preços de energia elétrica em comparação aos preços que eram praticados aquando da celebração do acordo [19].

Apesar dos contratos padronizados apresentarem muitos benefícios, este tipo de instrumento financeiro apresenta algumas limitações no que diz respeito às posições dos agentes serem tomadas em torno de expectativas. Essas expectativas, caso não se confirmem, podem pôr em causa todos os rendimentos esperados.

2.1.2.2 Contratos Bilaterais Não Padronizados

Este tipo de contrato é celebrado por duas entidades que entram em contacto direto, dispensando assim um intermediário, levando a que exista um maior risco de incumprimento da contraparte, comparado com o mercado de bolsa (dado que não existe quem assegure a contraparte, no caso se uma das partes falhar o seu compromisso na data de entrega). Ao contrário do que acontece no mercado organizado, os contratos não padronizados são negociados no mercado de balcão.

No entanto, a possibilidade de negociação livre entre agentes traduz-se em efeitos positivos no mercado, pois permite às entidades consumidoras expressarem as suas reais necessidades, acabando por introduzir uma procura elástica no mercado grossista, que como consequência irá criar uma maior estabilidade de preços, provocada pelo aumento de energia transacionada através de contratos bilaterais e consequente redução de energia transacionada no mercado em bolsa, traduzindo assim numa diminuição do poder de mercado dos agentes geradores [20].

A liquidação deste tipo de contrato é física, existindo um compromisso partilhado, onde uma das partes se compromete a fornecer uma determinada quantidade de energia, enquanto a outra parte se compromete a receber essa mesma energia e a efetuar o pagamento.

A liberdade de negociação entre os agentes é total, no entanto, os mesmos deverão ter em conta alguns termos negociados entre as partes (nomeadamente o volume de energia e a respetiva data e local de entrega) por forma a não colocar impedimentos na rede elétrica, dado as limitações que esta possui. Como tal, o OS, não tendo a hipótese de

identificar o preço negociado entre os agentes, apenas pode garantir a viabilidade técnica do conjunto de contratos celebrados em simultâneo na rede elétrica [1].

Este tipo de contratação bilateral permite que o preço da energia elétrica seja mais estável, sendo por isso que a celebração deste tipo de contrato envolva um horizonte temporal de longo prazo (tipicamente iguais ou superiores a 1 ano), o que se vai traduzir numa menor exposição à volatilidade de preços associada ao mercado em bolsa [21].

No entanto, existe um certo risco associado a este formato de contratação, que se prende com a possibilidade de estabelecer um acordo penalizador para uma das partes envolvidas ou mesmo para ambos, o que por sua vez poderá resultar na perda de todo o potencial benefício [22]. Tendo presente que o preço da energia estabelecido num contrato bilateral é fixo, existe um certo risco, seja por oscilação dos preços dos combustíveis fosseis ou por possíveis erros de previsão da carga a alimentar, levando a que o preço acordado entre os agentes possa por vezes ser inferior ou superior ao preço do mercado em bolsa [20, 23].

Para além dos aspetos referidos anteriormente relativos a este modelo de contratação é também importante realçar que um aumento do número deste tipo de contratos pode ter efeitos negativos no mercado, pois pode acabar por reduzir a transparência de preços, levando a que algumas empresas sejam forçadas a abandonar o mercado. Se o número de empresas a abandonar o mercado for elevado, o mercado pode se afastar do modelo económico de concorrência perfeita, permitindo assim que os agentes com maior poder de mercado possam manipular os preços a seu favor [15]. Outro aspeto importante é que os contratos bilaterais são incompatíveis com um despacho que seja otimizado de forma centralizada, contrariando o funcionamento dos sistemas elétricos e de algumas bolsas.

Os contratos *forward*, opções e *swap* também podem ser negociados entre dois agentes diretamente sem necessidade de recorrerem as ferramentas dos mercados, o que faz com estes também possam ser considerados contratos bilaterais não padronizados.

Sendo os preços e volumes de energia transacionados neste tipo de mercado dependentes exclusivamente dos comportamentos e crenças dos participantes, é necessário que o módulo do mercado bilateral, descrito no capítulo 7, se encontre dotado de uma ferramenta que capaz de replicar as características exclusivas de cada agente. O capítulo 3 faz a descrição de diversas ferramentas multi-agente, nomeadamente o JADE, capazes de representar os diversos agentes de uma forma credível, assegurando assim que o módulo apresenta resultados fidedignos.

2.1.3 Mercado Misto

O modelo de mercado misto, ou híbrido, consiste na combinação de dois modelos, o modelo em bolsa e o modelo de contratos bilaterais. A junção destes dois modelos per-

mite aos agentes consumidores terem uma maior variedade de opções, visto que este modelo de mercado permite a negociação direta entre os agentes produtores (que poderão oferecer condições mais vantajosas) através da celebração de um contrato bilateral ou, em alternativa, a aquisição voluntária de energia elétrica recorrendo ao mercado em bolsa.

Este modelo foi adotado pela grande maioria dos países onde ocorreu ou ainda se encontra a ocorrer a reestruturação do sector elétrico, como é o exemplo de Portugal e Espanha, ou os países do Norte da Europa que integram o *NordPool*.

Tal como no modelo de bolsa, a entidade responsável pelas transações na bolsa é o OM, sendo também a entidade responsável pela gestão e organização dos contratos acordados. Posteriormente, o OS verifica a viabilidade técnica do despacho provisório resultante da negociação em bolsa e dos acordos celebrados através da modalidade de contratos bilaterais [24]. Se as restrições forem respeitadas, o OS irá enviar o despacho final aos produtores, e se for necessário irá contratar os serviços de sistemas necessários, enviando a informação do trânsito de potência previstos para a rede de transmissão. Caso existam situações de congestionamento na rede, o OS informará os agentes intervenientes, podendo ativar o mercado intradiário com o objetivo de solucionar as situações de inviabilidade técnica ao receber propostas de incremento/decremento da potência a transitar [14].

O funcionamento deste tipo de mercado encontra-se representado na Figura 2.1.

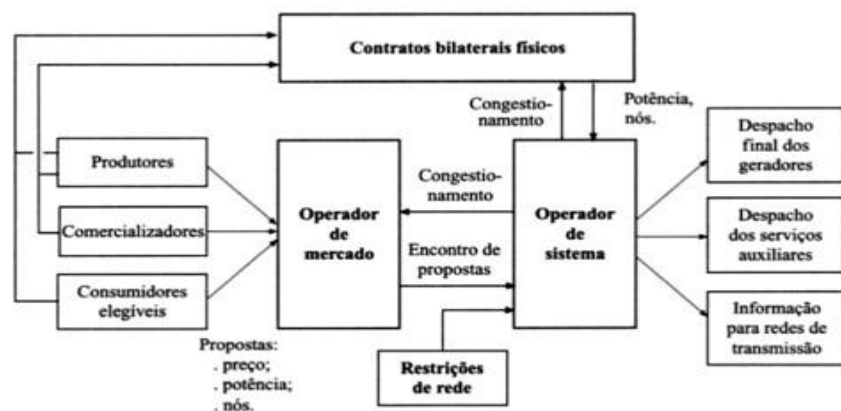


Figura 2.1 – Modelo misto de exploração do sector elétrico [1]

2.1.4 Mercado de Serviços de Sistema

Os sistemas de energia elétrica em corrente alternada funcionam a uma frequência e tensão constantes. Tendo em conta que estas grandezas têm de ser reguladas visto que, qualquer alteração é prejudicial ao funcionamento do sistema elétrico, e sabendo que os participantes no mercado transacionam energia elétrica com base nas previsões e históricos de consumo, e que ao longo da operação da rede elétrica existem alturas em que existem diferenças entre o consumo real e a produção contratada [25], torna-se imperativo que exista um equilíbrio continuado entre a geração e o consumo [26]. Assim sendo, os

serviços de sistema funcionam como serviços contemplares necessários para garantir a qualidade, a fiabilidade e a segurança dos sistemas elétricos.

Neste tipo de mercado, os serviços podem ser obrigatórios (e não renumerados) ou voluntários (renumerados em bolsa ou através de contratos bilaterais físicos) e funcionam de forma independente a nível nacional.

Em Portugal, a REN (Redes Elétricas Nacionais) funciona como Gestor Global de Sistema (GGS), sendo responsável por comprar a energia proveniente deste tipo de mercado e de definir as necessidades destes serviços [27].

Os serviços de regulação são obrigatórios e estão diretamente ligados ao controlo de frequência do sistema elétrico nacional (SEN). Na Europa, os serviços são impostos pela ENTSO-E (*European Network of Transmission System Operators for Electricity*). O GGS é responsável por garantir os valores de reserva de potência para os diferentes tipos de reserva, a sequência com que são ativadas, o tempo de resposta e a localização das mesmas, sendo que os custos associados à reserva de segurança presente no SEN são suportados por todos os consumidores de energia elétrica [28].

A reserva de regulação necessária encontra-se dividida em duas partes distintas [29]:

- Reserva de regulação a subir – Diferença entre o limite técnico superior de produção da unidade física e o valor da potência contratada nos mercados organizados, sendo vista como uma compra por parte do GGS;
- Reserva de regulação a descer – Diferença entre a potência contratada nos mercados organizados e o limite inferior de produção da unidade física, sendo vista como uma venda do GGS.

Dependendo do tempo de ativação, existem três níveis de reserva: primária, secundária e terciária. Estas reservas encontram-se disponíveis para a regulação a subir e para a regulação a baixar.

A ativação das diferentes reservas é efetuada da seguinte forma [30]:

1. A reserva primária, é ativada assim que ocorre uma perturbação, funcionando como uma resposta automática por parte das unidades de produção que limita o desvio em poucos segundos. Por norma, esta reserva não é suficiente para restaurar a frequência ao seu valor nominal;
2. A reserva secundária, inicia-se 30 segundos após a perturbação, sendo ativada automaticamente ou manualmente, com o objetivo de repor o valor da frequência. A ação desta reserva deve ser concluída em 15 minutos;
3. A reserva terciária, a ativação automática ocorre quando é necessário complementar a ação da reserva secundária, sendo que a ativação manual ocorre quando existe

a necessidade de repor os valores da reserva secundária após a correção da frequência do sistema. A ativação desta reserva é da responsabilidade do GGS.

2.1.4.1 Reserva primária

A regulação primária é um serviço de sistema prioritário, fornecido pelos geradores em serviço, obrigatório e não renumerado, que visa a correção de desequilíbrios instantâneos entre a geração e o consumo. Este controlo é assegurado pelos reguladores de velocidade das turbinas de cada gerador [26].

Em Portugal, o serviço de regulação é um serviço não renumerado, sendo obrigatório para todos os produtores vinculados e não vinculados com potência aparente instalada superior a 10 MVA. O gestor de sistema tem a obrigação de definir a margem de potência que os produtores devem dispor rapidamente na rede se necessário. Esta margem é determinada de acordo com as datas e os critérios de regulação do sistema de interligação europeu estabelecidos pelo ENTSO-E [28].

2.1.4.2 Reserva secundária

A reserva secundária é um serviço obrigatório e renumerado para os produtores vinculados. Para os produtores não vinculados, o serviço é voluntário e só será fornecido se existir um acordo para o efeito através da celebração de contratos bilaterais [28]. Este serviço surge como necessidade de garantir o abastecimento e segurança da rede a curto e médio prazo ao manter a frequência dentro de uma determinada área (por exemplo, um país) e o controlo dos intercâmbios de potências entre redes interligadas [31].

Sendo um serviço obrigatório para os produtores vinculados, as ofertas no mercado para esta regulação são obrigatórias para todas as unidades físicas que se encontrem habilitadas e disponíveis para o seu fornecimento. Cada oferta deve indicar, por unidade física e para cada um dos períodos de programação do dia seguinte, uma banda de regulação, discriminada por sentido de regulação (em MW) e o respetivo preço unitário por banda (em €/MW).

Esta reserva é determinada para cada hora do dia pelo GGS, em função da evolução temporal do consumo e da probabilidade de falha dos grupos geradores. Em Portugal, o controlo é do tipo centralizado, sendo feito pelo GGS que atua diretamente nas unidades afetas ao serviço de regulação secundário através do seu regulador automático [29].

Para participar na prestação deste serviço de sistema é obrigatório obter a devida habilitação junto do GGS, que por sua vez verifica se a unidade física possui as capacidades técnicas e operativas para prestarem este serviço nas condições exigidas [27].

O valor mínimo da banda de reserva é determinado pela ENTSO-E, através da Equação 2.1, em função da potência de consumo máxima prevista na respetiva zona e horário de programação [32]:

$$R = \sqrt{(a \times L_{max}) + b^2} - b \quad \text{Equação 2.1}$$

onde:

- R é o valor da reserva necessária, em MW;
- a é o coeficiente empírico com o valor de 10 MW;
- L_{max} é o pico máximo de consumo previsto, em MW;
- b é o coeficiente empírico com o valor de 150 MW.

Os participantes deste tipo de mercado são informados pelo GGS todos os dias antes das 13:00h acerca da reserva secundária necessária para cada período de programação do dia seguinte, determinada em função da evolução previsível do consumo e da probabilidade esperada de falha dos geradores ligados. A informação comunicada pelo GGS deve conter o valor da reserva de regulação a subir e a baixar, devendo ainda especificar o valor máximo e mínimo da banda de regulação da oferta [27].

A comunicação das ofertas, para cada período de programação e por unidade física habilitada e disponível para prestar o serviço de regulação secundária, deverá ocorrer entre as 18:00h e as 18:45h. Após o encerramento do período de receção de ofertas, o GGS contrata a banda de regulação secundária associada às ofertas que representem um menor encargo.

O funcionamento do mercado de reservas de regulação secundárias é uma das partes integrantes no módulo do mercado de reservas, que se encontra descrito no capítulo 5.

2.1.4.3 Reserva terciária

A reserva terciária é uma reserva adicional com despachos em tempo real usada para garantir a cobertura do consumo e o funcionamento do sistema elétrico, perante incidência que esgotem as reservas primárias e secundárias. Para além da sua principal função, a reserva terciária é utilizada como complemento a reserva secundária, com o objetivo de garantir a reposição da frequência para o valor programado, podendo ser ativada automaticamente ou manualmente pelo operador de rede [27].

A regulação terciária garante o funcionamento da reserva de regulação secundária nos devidos tempos atuando no ponto de funcionamento dos geradores ligados, desligando cargas controláveis inclusive em centrais em funcionamento de bombagem (consumo) e ligando ou desligando grupos da rede. Para além de garantir a restituição dos níveis da reserva secundária, a reserva de regulação terciária redistribui a potência injetada nas interligações para uma utilização mais económica e viável da potência de regulação secundária [29].

Para repor a reserva secundária, a reserva terciária tem um tempo máximo de reposição de 15 minutos. No entanto, se a reserva terciária for usada para otimizar a operação

da rede do ponto de vista técnico e económico, esta pode encontrar-se em funcionamento por um período mais estendido [27].

Este serviço de regulação é renumerado, sendo contratado em mercados específicos de âmbito nacional, em que todos os agentes com instalações de produção ou de consumo para bombagem têm de oferecer para cada dia e cada período programado, toda a oferta de regulação que tenham disponível [31].

As ofertas para cada uma das horas programas do dia seguinte têm de ser submetidas até as 20 horas do dia anterior, com as ofertas a terem de apresentar o valor da reserva disponível para subir e para baixar (em MW) e o respetivo valor (em €/MWh) [27].

O funcionamento do mercado de reservas de regulação terciária é uma das partes presentes no módulo do mercado de reservas, que se encontra descrito no capítulo 5.

2.2 Mercado Ibérico de Eletricidade

O Mercado Ibérico de Eletricidade (MIBEL) é o resultado de uma iniciativa conjunta da República Portuguesa e do Reino de Espanha, tendo como principal objetivo a integração dos sistemas elétricos dos dois países.

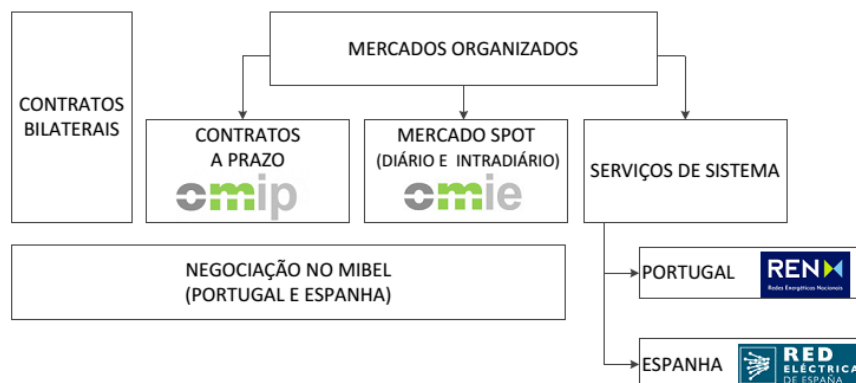


Figura 2.2 – Estrutura de negociação de energia no MIBEL [25]

A Figura 2.2 apresenta o modelo de funcionamento do MIBEL, que assenta em duas vertentes de mercados distintas: os mercados organizados e os mercados não organizados [25].

Os mercados organizados englobam o mercado em bolsa (ou *spot*), o mercado a prazo e o mercado de serviços de sistemas. O mercado *spot* engloba o mercado diário e o mercado intradiário. No mercado a prazo, a negociação é feita num horizonte de semanas, meses ou anos. Fora da esfera do MIBEL, encontra-se o mercado de serviços de sistemas, que têm a particularidade de ser gerido independentemente por cada país, ao contrário dos outros mercados.

Nos mercados não organizados são efetuadas as transações de energia conhecidas como *over-the-counter* (OTC), onde é possível celebrar contratos bilaterais não padronizados.

O OMI (Operador de Mercado Ibérico) encontra-se dividido em dois polos, nomeadamente o polo português (OMIP), que assume a responsabilidade de gerir o mercado a prazo, e o polo espanhol (OMIE), responsável pelo mercado em bolsa (mercado diário e intradiário) [33].

De realçar que cada um dos polos, detém metade da OMIClear (Sociedade de Compensação de Energia S.A.), sendo que esta gere as posições resultantes de todas as operações registadas, assumindo um papel de intermediário em todas as trocas registadas, ou seja assume o papel de comprador perante o vendedor e o papel de vendedora perante o comprador, fazendo uso de um conjunto de procedimentos para controlar o risco assumido por ambas as partes, nomeadamente através da exigência de um depósito e da gestão de garantias, garantindo assim uma supervisão de todo o mercado [19].

2.2.1 Mercado Diário

O mercado diário do MIBEL é caracterizado por ser um mercado organizado a curto prazo onde é transacionada energia elétrica para entrega no dia seguinte ao dia da negociação. Este tipo de mercado define o preço para cada uma das 24 horas do dia seguinte durante 365 (ou 366) dias de cada ano.

A plataforma de mercado diário abrange Portugal e Espanha, sendo a gestão entregue ao operador espanhol do MIBEL, o OMIE.

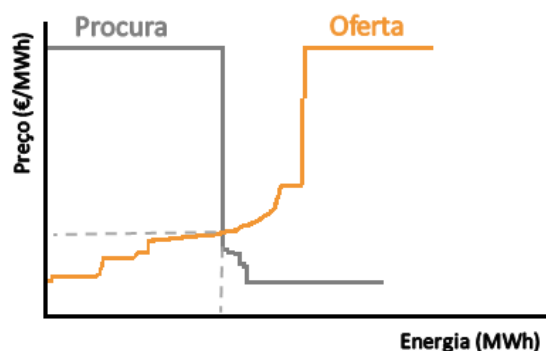


Figura 2.3 – Modelo de oferta e de procura para o mercado diário [34]

O funcionamento deste tipo de mercado é assente no cruzamento de ofertas simples ou complexas de compra e venda, por parte dos diversos agentes autorizados a atuar no mercado diário. As ofertas têm de conter o dia e a hora a que se reporta, o preço e a quantidade de energia correspondente. A ordenação das ofertas será então efetuada por ordem crescente (para ofertas de compra) ou decrescente (para ofertas de procura). A

interseção das curvas da oferta e procura irá definir o preço de mercado, como se pode observar na Figura 2.3. Este funcionamento de mercado permite garantir que todos os agentes consumidores paguem o mesmo preço e todos os agentes vendedores apenas sejam renumerados ao preço marginal [34].

Visto que o mercado diário do MIBEL abrange Portugal e Espanha torna-se imperativo que seja verificado se as capacidades de interligação entre os dois países conseguem suportar os fluxos transfronteiriços de energia resultantes da negociação que ocorre neste mercado. Caso exista a impossibilidade de transmissão na rede, as regras atuais determinam que haja uma separação dos preços de mercado (*market splitting*) onde terão de ser encontrados/determinados novos preços para cada país. Esta separação de mercados ocorre de acordo com as regras definidas pelo Conselho Ibérico de Reguladores para o mercado.

O funcionamento do mercado diário serve de base para o desenvolvimento do módulo do mercado diário que se encontra descrito no capítulo 4.

2.2.2 Mercado Intradiário

Após a conclusão da sessão de mercado diário, o MIBEL permite aos agentes complementarem a oferta efetuada no mercado diário através de licitações no mercado intradiário. Os ajustes podem ser de compra ou venda de energia elétrica (até quatro horas antes da hora real) e podem ser efetuados por agentes que tenham participado no mercado diário, mercado a prazo ou que tenham celebrado um contrato bilateral [35].

A semelhança do mercado diário, o mercado intradiário é gerido pelo OMIE, sendo que as ofertas de compra ou venda de energia elétrica são efetuadas em seis sessões distintas, onde cada oferta é composta pelo dia e hora a que se reporta, a sessão a que se destina e o preço e volume de energia elétrica associados. O mercado intradiário funciona de acordo com os seguintes intervalos temporais:

- A primeira sessão forma o preço para as últimas quatro horas do dia de negociação e para as 24 horas do dia seguinte (total de 28 horas, das 20 horas do dia D-1 até às 24 horas do dia D);
- A segunda sessão forma o preço para as 24 horas do dia seguinte (das 00 horas às 24 horas do dia D);
- A terceira sessão forma o preço para as 20 horas do dia seguinte (das 05 horas às 24 horas do dia D);
- A quarta sessão forma o preço para as 17 horas do dia seguinte (das 08 horas às 24 horas do dia D);
- A quinta sessão forma o preço para as 13 horas do dia seguinte (das 12 horas às 24 horas do dia D);

- A sexta sessão forma o preço para as 9 horas do dia seguinte (das 16 horas às 24 horas do dia D);

O mercado intradiário acaba por também ser um mecanismo importante, na medida em que permite amenizar/atenuar o efeito de eventuais congestionamentos que poderão vir a acontecer na rede elétrica, possíveis avarias de equipamentos presentes na rede elétrica ou desvios de curto prazo previstos entre a produção e a geração de energia [36].

2.2.3 Mercado a Prazo

O mercado a prazo do MIBEL é caracterizado por ser um mercado organizado e regulamentado, gerido pelo OMIP - Operador do Mercado Ibérico de Energia (Pólo Português), S. A, encontrando-se em operação desde julho de 2006, sendo caracterizado por oferecer aos agentes participantes a possibilidade de negociarem e transacionarem instrumentos financeiros sob a forma de derivados com liquidação física ou financeira.

Os instrumentos disponibilizados pelo mercado a prazo permitem a compra e venda de energia elétrica, para um determinado período, podendo ser uma semana, um mês, um trimestre ou um ano, estando a sua celebração sujeita as regras presentes neste tipo de mercado [18]. A utilização destes instrumentos oferece aos agentes a proteção da sua posição tendo em conta o risco inerente à imprevisibilidade e volatilidade de preços associados ao mercado diário.

Para os agentes poderem participar neste tipo de mercado é necessário que obtenham a qualidade de membro negociador atribuída pelo OMIP. Só após a obtenção deste estatuto é que o agente poderá atuar por conta própria ou por conta de terceiros, podendo então negociar os diferentes tipos de contratos existentes no mercado [37].

Encontram-se disponíveis para negociar os seguintes tipos de contratos: futuros, *forward* e *swap*, sendo que estes contratos se encontram disponíveis para negociação numa forma padronizada [18]. A próxima secção apresenta o funcionamento destes tipos de contratos, com especial ênfase para os contratos de futuros.

2.2.3.1 Contratos Padronizados no MIBEL

Os principais termos de um contrato padronizado incluem o nominal, o valor mínimo de variação do preço (*tick*) e as condições de entrega [19].

Os contratos de Futuros disponibilizados pelo OMIP envolvem o fornecimento/receção de energia elétrica a uma potência constante de 1 MW durante o período de entrega, sendo que a energia se encontra a ser valorizada diariamente, com base no preço de referência *spot* [19]. O valor da potência, apesar de ser um termo padronizado no contrato, é passível de mudança, caso os agentes envolvidos cheguem a um novo acordo em relação

à potência contratada. O outro valor que pode ser negociado até se iniciar o período de entrega é o preço a pagar/vender por parte dos agentes envolvidos no contrato.

Existem dois tipos de produtos no que diz respeito ao perfil de carga:

- Tipo *baseload*, em que a energia disponibilizada é igual para todo o período de entrega. Neste tipo de contrato a energia é entregue durante 24 horas;
- Tipo *peakload*, que disponibiliza a mesma quantidade de energia no período de pico dos dias úteis (das 9:00 as 24:00) consoante o período de entrega. Neste tipo de contrato apenas é entregue energia durante as 16 horas em que existe o pico de energia.

No fim do período contratual, a liquidação dos produtos pode ser:

- Física - Passa pela entrega dos ativos negociados, neste caso a entrega de energia elétrica;
- Financeira - Entrega pelo agente comprador ao agente vendedor do montante acordado no contrato.

Nos contratos de futuros padronizados, o período de entrega varia consoante o tipo de carga e de liquidação. Caso o tipo de liquidação seja físico, independentemente do tipo de carga, o contrato dura entre uma semana, um mês, um trimestre ou um ano. Caso a liquidação seja financeira, os contratos do tipo *baseload* podem variar entre um dia, um fim-de-semana, uma semana, um mês, um trimestre ou um ano. Se o contrato for do tipo *peakload*, a duração deste é igual a duração do contrato de liquidação física [19].

O valor nominal de um contrato tem como unidade o MWh. A forma de cotação de um contrato é descrita em €/MWh. A flutuação mínima de preços (*tick*) é de 0,01€/MWh, sendo definido pelo OMIP.

O período de negociação é definido como o período compreendido entre o primeiro dia de negociação e o último dia de negociação, inclusive. O primeiro dia de negociação de um contrato é o primeiro dia em que se encontra disponível para negociação do mesmo. O último dia de negociação é o último dia em que o contrato se encontra listado para negociação, variando entre o dia anterior ao primeiro dia de entrega ou o dia anterior à antevéspera do primeiro de entrega, consoante o tipo de contrato.

Na data de vencimento do contrato ocorre a liquidação. Caso seja um contrato de entrega física, será efetuada a liquidação das duas componentes: a energia acordada é enviada para liquidação física no mercado diário gerido pelo OMIE e ocorre a liquidação financeira do contrato.

Durante o período de negociação é efetuada uma liquidação diária de ganhos e perdas, conforme as regras e procedimentos definidos pela OMIClear [19].

Durante o período de entrega, a OMIClear efetua a operação de valorização diária de cada contrato, e processa a liquidação financeira do valor de liquidação na entrega

(VLE), resultante do somatório das diferenças diárias dos dias de entrega do contrato entre o preço de referência *spot* (PRS) e o preço de referência de negociação (PRN) de cada contrato no último dia de negociação (UDN).

O PRS corresponde ao valor monetário do índice de cada tipo de contrato. Este valor é o equivalente à média aritmética dos preços formados no mercado diário gerido pelo OMIE. Se o contrato for do tipo *peakload*, o PRS é equivalente a atribuir 1 euro a cada ponto inteiro da média aritmética dos 16 preços horários que constituem o contrato do tipo *peakload*. O preço é mais uma vez o preço *Spot* e pode variar consoante o país onde é celebrado o acordo [19].

Cada ponto inteiro do índice é equivalente a 1 Euro, sendo que o índice é definido por ter duas casas decimais, pelo que o PRS é definido até ao cêntimo de Euro. Os preços de referência são divulgados pelo *website* do OMIClear.

Tendo em conta o fornecimento/receção de energia elétrica a uma potência constante para o número de horas de cada dia do período de entrega, o VLE é calculado usando a Equação 2.2:

$$VLE_d = H \times \sum_i^n [QF_i \times (PRS - PRN_i)] \quad \text{Equação 2.2}$$

onde:

- i é o contrato com entrega no dia d ;
- n é o número total de Contratos com entrega no dia d ;
- VLE_d é o Valor de Liquidação na Entrega relativo ao dia de entrega d , em €;
- H é o número de horas subjacente ao dia de entrega d ;
- PRS é o PRS para o dia de entrega d , em €;
- PRN_d é o PRN no UDN do Contrato i , com entrega no dia d , em €;
- QF_i é a posição aberta final do contrato i , com entrega no dia d , no final da sessão do UDN. Este indicador assume valores positivos caso se trate de um agente comprador, e torna-se negativo para o agente vendedor.

De realçar que o funcionamento e estabelecimento dos contratos padronizados de futuros serviu de base para o desenvolvimento do módulo do mercado de futuros, que se encontra descrito no capítulo 6.

3

3 Sistemas Multi-Agente e Agentes Computacionais Autônomos

O presente capítulo apresenta as principais características dos sistemas multi-agente (SMA) e dos agentes computacionais autônomos. Posteriormente, são apresentadas algumas das plataformas de SMA existentes, com especial incidência para o JADE (*Java Agent Development Framework*), utilizada no desenvolvimento do simulador MATREM (*Multi-Agent Trading in Electricity Markets*) – versão pedagógica. No final do capítulo, encontram-se apresentados alguns exemplos de ferramentas de simulação de mercados de energia elétrica baseadas em SMA.

3.1 Sistemas Multi-Agente

A liberalização do sector elétrico levou a um aumento dos participantes no mercado, o que proporcionou um aumento da competitividade e complexidade, dado que cada entidade tem os seus interesses e comportamentos imprevisíveis, levando a um mercado mais competitivo [38]. Neste sentido, as diversas entidades têm a necessidade de adaptar o seu comportamento e criar estratégias que maximizem o lucro, motivando a criação de novas soluções computacionais que permitam moldar o comportamento, a compreensão de relações complexas estabelecidas entre os diversos intervenientes, e o apoio às decisões tomadas [3].

O uso da tecnologia SMA surge como uma solução interessante para simular as relações existentes entre os agentes de um mercado, em cada agente possui os seus objetivos e características, originando formas diferentes de atuar e decidir. Para simular os diferentes comportamentos dos intervenientes, os SMA utilizam agentes computacionais autónomos que para além de terem a capacidade de modular o comportamento dos diversos intervenientes, possuem um comportamento autónomo, o que em conjunto com a componente social permite a sua interação, facilitando a resolução de problemas [3].

3.1.1 Agentes Computacionais Autónomos

O conceito de agente ainda é uma questão de debate, dado que o conceito é vago e controverso no seio da comunidade científica. Assim sendo, são aceites diversas definições. Uma das mais populares é a definição sugerida por Wooldridge e Jennings [39]:

“Um agente é uma entidade real ou abstrata capaz de agir sobre ela mesma e sobre o ambiente que a rodeia, e que dispõe de uma representação, ainda que parcial, desse mesmo ambiente. Num universo multi-agente, pode comunicar com outros agentes, resultando o seu comportamento das observações, conhecimento, e interações com outros agentes.”

Algumas das principais características dos agentes são as seguintes [20]:

- **Autonomia:** o agente funciona como uma entidade independente sem a necessidade de intervenção humana ou de outros agentes, devendo ser capaz de comunicar e interagir com outros agentes;
- **Habilidade Social:** o agente é capaz de interagir com outros agentes, ou com humanos, através de uma linguagem que permita a sua comunicação;
- **Reatividade ou Adaptabilidade:** o agente pode perceber o ambiente em seu redor e responder rapidamente às mudanças que ocorrem nele;

- Proatividade: o agente tem a capacidade de tomar a iniciativa de modo a atingir os seus objetivos, não se limitando a atuar consoante as alterações que acontecem no ambiente em que se encontra inserido.

Para além das capacidades referidas anteriormente, os agentes têm de ter outras capacidades, tais como a capacidade de comunicação, de mobilidade, de interação, de cooperação e flexibilidade, sendo possível dividir os agentes de acordo com as propriedades que estes possuem.

Relativamente ao comportamento, os agentes podem-se dividir-se em:

- Agentes competitivos: os agentes não colaboram entre si, privilegiando a competição, com a finalidade de atingirem os objetivos pré-estabelecidos;
- Agentes colaborativos: cada agente executa um conjunto de regras específicas, de forma coordenada, tendo em conta um objetivo comum.

Quanto à capacidade de perceção e memória, os agentes podem dividir-se em:

- Agentes reativos: são agentes que não possuem memória, o que faz com que estes sejam incapazes de prever ou antecipar quaisquer tipos de ações futuras, reagindo apenas a estímulos. Estes tipos de agentes são caracterizados por atuarem em sociedade;
- Agentes cognitivos ou deliberativos: são agentes que possuem memória, assumindo um poder de raciocínio elevado sobre as ações realizadas no passado o que leva a um aumento da capacidade de planejar ações futuras. Têm uma elevada capacidade de resolução de problemas de forma autónoma, capacidade que provem do elevado conhecimento do ambiente em que se encontram inseridos.

De realçar que todos os tipos de agentes assumem uma função importante no ambiente em que se encontram. No entanto, nem todos os agentes que não usufruem das propriedades anteriormente descritas.

O uso de agentes na simulação de mercados de energia encarece de duas importantes vantagens. Em primeiro, os SMA permitem uma forma mais realista de modelação. A outra das vantagens prende-se com o facto de os SMA serem mais apropriados para a modelação de sistemas a uma grande escala, visto o envolvimento de diversos participantes que interagem entre si e que assumem diferentes comportamentos, funcionalidades, posições e decisões [20].

Estas vantagens acabam por determinar a utilização das tecnologias SMA em contexto de mercados de energia elétrica, visto que estes apresentam uma elevada complexidade, e todos os participantes tem comportamentos distintos no momento da negociação e na interação entre si.

3.1.2 Plataformas Computacionais para Sistemas Multi-Agente

Esta secção apresenta três plataformas computacionais baseadas em agentes, nomeadamente o JADE, o REPAST (*Recursive Porous Agent Simulation Toolkit*) e o OAA (*Open Agent Architecture*). Será atribuído um maior destaque ao JADE, visto ser a plataforma utilizada no desenvolvimento do MATREM, que serve de base ao desenvolvimento dos módulos descritos nos capítulos 4-7.

3.1.2.1 Java Agent Development Framework

A plataforma JADE, tal como o nome indica, é uma plataforma baseada na linguagem Java, tendo sido desenvolvida pela *Telecom Italia LAB (TILAB)* [40].

Esta plataforma multi-agente é caracterizada por ser uma ferramenta *open-source*, estando o seu código disponível para qualquer utilizador. Esta característica acaba por ser determinante, pois através da disseminação e partilha com qualquer utilizador ou comunidade, o JADE continuará a apresentar melhorias e atualizações.

O JADE apresenta propriedades importantes que possibilitam o desenvolvimento de agentes computacionais, tais como a mobilidade dos agentes, assegurando a possibilidade de serem executados em diferentes máquinas e sistemas operativos. A configuração é controlada através de uma interface gráfica [41].

A plataforma JADE permite ainda o desenvolvimento de aplicações multi-agente respeitando as especificações da FIPA (*Foundation for Intelligent Physical Agents*). Para que os sistemas possam possuir uma maior interoperabilidade, é necessário que esteja assegurada a capacidade de comunicação e troca de informações sem que ocorram situações de discórdia. As especificações da FIPA para a interoperabilidade determinam que [13, 39]:

- O nome de um agente serve para indicar a sua localização (serviço de nomes);
- Seja possível a um agente localizar outros agentes através do serviço que disponibiliza (serviço de páginas amarelas);
- Todos os outros aspetos que não fazem parte do agente, independentes das aplicações, tais como o transporte, codificação, interpretação de mensagens e ciclo de vida do agente, devem-se encontrar devidamente descritos (aspetos extra-agente).

Todas estas características fizeram do JADE a plataforma escolhida para o desenvolvimento do simulador MATREM, concretamente do módulo relativo à contratação bilateral de energia através de contratos flexíveis (com possibilidade de negociação da maioria dos seus termos e condições).

3.1.2.2 Recursive Porous Agent Simulation Toolkit

A plataforma REPAST é essencialmente uma plataforma de modelação de agentes que permite a realização de simulações com o intuito de investigar o seu comportamento e a sua evolução nos ambientes onde se encontram inseridos.

O REPAST foi desenvolvido na Universidade de Chicago, sendo também uma plataforma *open-source* [42]. A plataforma REPAST possui três versões diferentes, adaptadas às linguagens de programação Java, .NET e Python (*Repast J*, *Repast.NET* e *Repast Py*, respetivamente) [43].

O REPAST coloca a ênfase no comportamento social dos agentes, sendo a plataforma eleita para o desenvolvimento do simulador EMCAS (*Electric Market Complex Adaptive System*).

3.1.2.3 Open Agent Architecture

O OAA é uma ferramenta de investigação destinada ao desenvolvimento de SMA, tendo sido desenvolvida pelo Centro de Investigação da SRI. Esta plataforma utiliza uma linguagem de comunicação comum a todos os agentes, que também permite a partilha de informação, realização de ações e consulta de dados. De notar que, para a criação e desenvolvimento, a plataforma OAA oferece uma biblioteca com diferentes linguagens de programação, nomeadamente o C, C++ e Java [44].

O OAA recorre a um agente “facilitador”, que tem como objetivo ser o mediador entre os agentes participantes, utilizando estratégias de coordenação independentes do domínio da aplicação. Esta plataforma também tem a capacidade de suportar uma grande diversidade de agentes, independentemente da linguagem em que foram desenvolvidos, ou sistema operativo onde são executados.

A plataforma OAA foi utilizada no desenvolvimento da versão inicial do simulador MASCEM (*Multi-agent Simulator for Competitive Electricity Markets*).

3.2 Simuladores Multi-Agente de Mercados de Energia Elétrica

Esta secção apresenta 3 simuladores multi-agente, nomeadamente o EMCAS, o MASCEM e o MATREM.

3.2.1 Electric Market Complex Adaptive System (EMCAS)

O EMCAS é um simulador desenvolvido pelo Argonne National Laboratory, pertencente ao Centro de Energia, Ambiente e Sistemas de Análise Económica, possibilitando o desenvolvimento de agentes com recurso à plataforma REPAST.

O EMCAS surgiu como uma ferramenta para estudar os efeitos da reestruturação do sector elétrico, a influência da concorrência nas variações dos preços, os limites operacionais e os critérios de segurança da rede [45]. Importa realçar que o EMCAS é uma ferramenta muito utilizada pelo sector elétrico, nomeadamente pela REN, para analisar o MIBEL [46].

Ao usar o EMCAS, o utilizador pode simular o comportamento dos agentes em diversos MEE's, tendo em conta as limitações operacionais da rede. O utilizador pode criar diversos tipos de agentes: produtores, consumidores, de transporte, de distribuição, operadores de mercado e reguladores. Os agentes presentes no EMCAS têm a capacidade de adaptação aos acontecimentos, ajustando o seu comportamento consoante os sucessos e os insucessos da sua operação, possuindo capacidade de decisão e de aprendizagem. Através destas aptidões, os agentes são capazes de analisarem e explorarem diversas estratégias de licitação que se encontrem disponíveis [15, 47]. A capacidade de decisão é baseada na informação de cada agente e na informação pública disponível relativa aos outros agentes participantes e ao próprio mercado [24].

3.2.2 Multi-Agent Simulator for Competitive Electricity Markets (MASCEM)

O MASCEM (na sua versão inicial) é um simulador multi-agente desenvolvido pelo Grupo de Investigação em Engenharia do Conhecimento e Apoio à Decisão do Instituto Superior de Engenharia do Porto, usando a plataforma OAA, tendo como linguagem base o Java [48].

O MASCEM funciona fundamentalmente como simulador de apoio à tomada de decisão em diferentes tipos de mercado, tendo como intuito permitir ao utilizador analisar as decisões tomadas pelos agentes. A modelação dos agentes é baseada em técnicas de Inteligência Artificial, sendo contemplados agentes produtores, consumidores, retalhistas, operadores de mercado e de sistema e um agente “*facilitador*”, responsável por coordenar e monitorizar as simulações dos diversos MEE's [49].

A simulação decorre usando diferentes estratégias de licitação, que variam com o tempo, podendo ser estratégias com base em informação histórica relativa ao mercado, bem como informação histórica relativa a decisões anteriores dos diversos agentes [48].

3.2.3 Multi-Agent Trading in Electricity Markets (MATREM)

O simulador MATREM, usado como base na presente dissertação, é um simulador desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), no âmbito do projeto MAN-REM (*Multi-agent Negotiation and Risk Management in Electricity Markets*). A linguagem utilizada no simulador é o Java, sendo a plataforma JADE utilizada

como base para a definição de agentes. A interface encontra-se escrita em inglês, de forma a garantir que o MATREM se encontre disponível em vários domínios [5, 6].

Numa primeira fase, o MATREM apenas permitia recuar a negociação no mercado de contratação bilateral. Posteriormente, o simulador foi alvo de várias atualizações, que permitiram acrescentar novas funcionalidades, sendo de realçar os módulos para simular o mercado em bolsa (diário e intradiário), o mercado de reservas (secundária e terciária) e o mercado de futuros.

A simulação do mercado em bolsa (diário e intradiário) pode ser feita usando dois algoritmos distintos:

- Algoritmo SMP (*System Marginal Pricing*) – o algoritmo tem em conta todas as ofertas de compra e venda, organizando-as de acordo com a hora e o preço, e criando as curvas de oferta e da procura. A interseção destas duas curvas determina o preço de mercado e o volume de energia que irá ser comercializado;
- Algoritmo LMP (*Locational Marginal Pricing*) – o algoritmo define os preços de acordo com a localização da rede. O cálculo dos preços e volumes de energia a transitar é feito de maneira análoga ao algoritmo SMP, mas com a limitação da rede. Esta é modelada como uma rede com pelo menos 2 nós e 1 ramo, sendo o utilizador o responsável por definir os diversos parâmetros necessários para o seu funcionamento.

Relativamente ao mercado de reservas, o MATREM garante que as bandas contratadas no mercado de reservas secundária devem apresentar um desvio de $\pm 5\%$ da banda necessária calculada. Para o mercado de reservas terciária, o MATREM garante que 90% das necessidades são colmatadas pela reserva de regulação terciária, enquanto que os restantes 10% são satisfeitos pela reserva de regulação secundária.

Ao negociar os contratos de futuros padronizados, o MATREM oferece ao utilizador a hipótese de negociar:

- Contrato diários de entrega financeira do tipo *peakload* ou *baseload* para os 5 ou 7 dias seguintes, respetivamente;
- Contrato de fins-de-semana de entrega física e do tipo *baseload* para os 2 fins-de-semana seguintes;
- Contrato semanais de entrega física ou financeira e do tipo *baseload* ou *peakload* para as 3 semanas seguintes;
- Contrato mensais de entrega física ou financeira e do tipo *baseload* ou *peakload* para os 6 meses seguintes;
- Contrato trimestrais de entrega física ou financeira e do tipo *baseload* ou *peakload* para os 7 trimestres seguintes;

- Contrato anuais de entrega física ou financeira e do tipo *baseload* ou *peakload* para os 4 anos seguintes.

Para negociar os contratos bilaterais não padronizados, o MATREM oferece ao utilizador a hipótese de detalhar os pormenores necessários para a correta conceção de um contrato: a hora em que se inicia a entrega de energia, a duração do contrato, e o volume de energia e respetivo preço. Também é possível estabelecer diferentes tarifas consoante as horas em que o contrato se encontra em vigor. Ao longo da negociação, o MATREM permite analisar e aconselhar o utilizador a aceitar a última proposta feita pela contraparte, se a nova proposta feita pelo utilizador, ou calculada automaticamente pelo simulador, for pior que a proposta recebida.

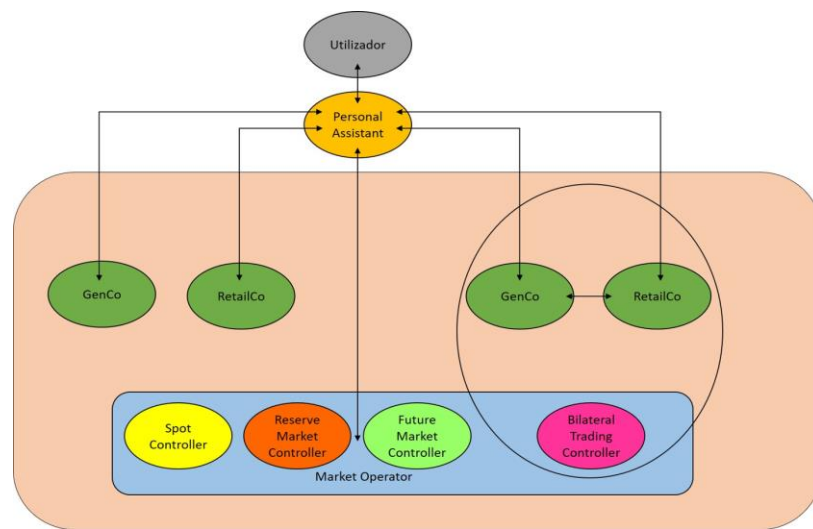


Figura 3.1 – Funcionamento da versão utilizada neste trabalho do simulador MATREM [50]

Na versão utilizada na presente dissertação, o MATREM possui um agente responsável pela ligação entre o utilizador e a interface gráfica do mesmo, e por estabelecer a comunicação entre o operador de mercado e os agentes participantes, como se pode observar na Figura 3.1. Por sua vez, o agente operador de mercado é responsável pela execução dos algoritmos de cálculo de preços.

Para além dos agentes referidos anteriormente, o simulador disponibiliza mais quatro tipos de agentes:

- Os agentes produtores (*GenCo*), que atuam como produtores de energia, e que têm como objetivo a maximização do lucro pela sua venda em mercados organizados, ou diretamente aos retalhistas e consumidores, através da contratação bilateral.
- Os agentes retalhistas (*RetailCo*), que operam como compradores de energia, para de seguida a venderem aos seus clientes, e que têm como principal objetivo a maximização do lucro.

- Os agentes agregadores, que combinam grupos de consumidores, com o objetivo de comprarem grandes quantidades de energia a um preço mais baixo, comparado com o preço que pagariam caso fossem comprar energia isoladamente.
- Os agentes consumidores, nomeadamente os grandes consumidores, que tomam uma posição ativa no mercado, ao comprarem energia diretamente do mercado, seja através de contratos bilaterais com os agentes produtores ou através de agentes retalhistas, e também os pequenos consumidores, que não podem ter isoladamente uma posição ativa no mercado.

A organização e interação dos agentes de mercado presentes no MATREM encontra-se presente na Figura 3.2.

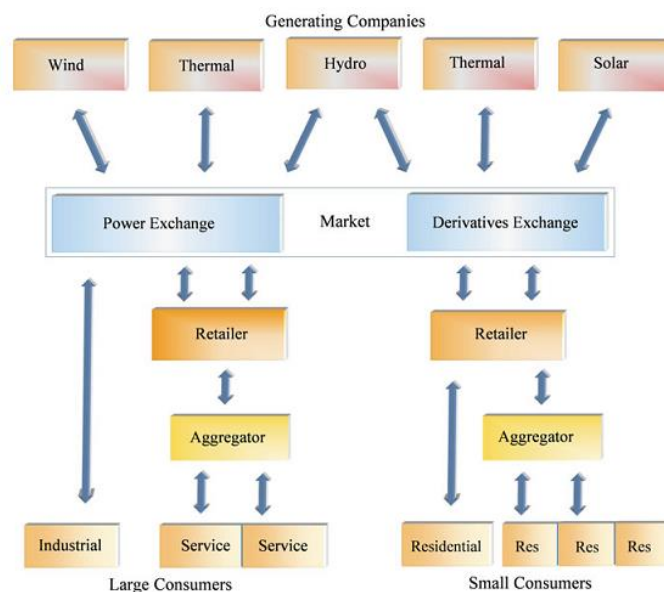


Figura 3.2 – Organização e interação entre os agentes de mercado do MATREM [3]

A interface principal do MATREM, ilustrada na Figura 3.3, permite ao utilizador aceder às várias opções do simulador: *Agents*, *Markets*, *Participants* e *Simulation*. É através destes menus que é possível recriar o processo de negociação:

- **Gestão de agentes:** Através do menu *Agents*, o utilizador pode criar agentes, carregar agentes existentes e eliminar agentes ativos;
- **Construção de cenários:** Através dos menus *Markets* e *Participants*, o utilizador pode escolher o tipo de mercado a simular, nomeadamente o mercado em bolsa (diário ou intradiário), mercado de reservas (secundário ou terciário), mercado de futuros ou mercado de contratos bilaterais e os respetivos participantes, respetivamente;
- **Gestão da simulação:** Através do menu *Simulation*, o utilizador efetua a simulação do mercado escolhido, assim como monitorizar simulações ativas, bem como salvaguardar dados relativos a simulações anteriores;

O MATREM também permite ao utilizador visualizar e analisar os resultados obtidos na simulação. Os resultados podem ser representados em tabelas ou em gráficos. Os resultados podem também ser exportados para ficheiros externos para uma análise posterior.

A área por baixo da barra de menus é dividida em diversas janelas, que descreve as diversas ações que ocorrem no simulador. A janela central inferior exhibe a informação relativa aos preços diários praticados no MIBEL.

Na Tabela 3.1, encontram-se presentes algumas das principais características e capacidades presentes nos simuladores EMCAS, MASCEM e MATREM.

Tabela 3.1 – Principais capacidades e características dos simuladores

	EMCAS	MASCEM	MATREM
Desenvolvedor	Argonne National Laboratory	Instituto Superior de Engenharia do Porto	LNEG
SMA	REPAST	OAA	JADE
Principal objetivo	Estudar os efeitos da reestruturação do sector elétrico, a influência da concorrência nas variações dos preços, os limites operacionais e os critérios de segurança da rede.	Apoio à tomada de decisão em diferentes tipos de mercado, tendo como intuito permitir ao utilizador analisar as decisões tomadas pelos agentes.	Realização de simulações com o objetivo de analisar o comportamento e resultados de diferentes MEE's.
Tipos de agente presentes no simulador	Produtores, consumidores, transporte, distribuição, operadores de mercado e reguladores.	Produtores, consumidores, retalhistas, operadores de mercado e de sistema e um agente “ <i>facilitador</i> ” de mercado.	Produtores, retalhistas, agregadores, consumidores, operadores de mercado e de sistema.
Tipos de mercados	Mercado em bolsa e mercado de contratos bilaterais.	Mercado em bolsa, mercado de futuros, mercado de balanços e mercado de contratos bilaterais.	Mercado em bolsa, mercado de reservas, mercado de futuros e mercado de contratos bilaterais.

De realçar, que o MATREM serviu de base para o desenvolvimento dos 4 módulos que se encontram presentes nos capítulos 4-7.

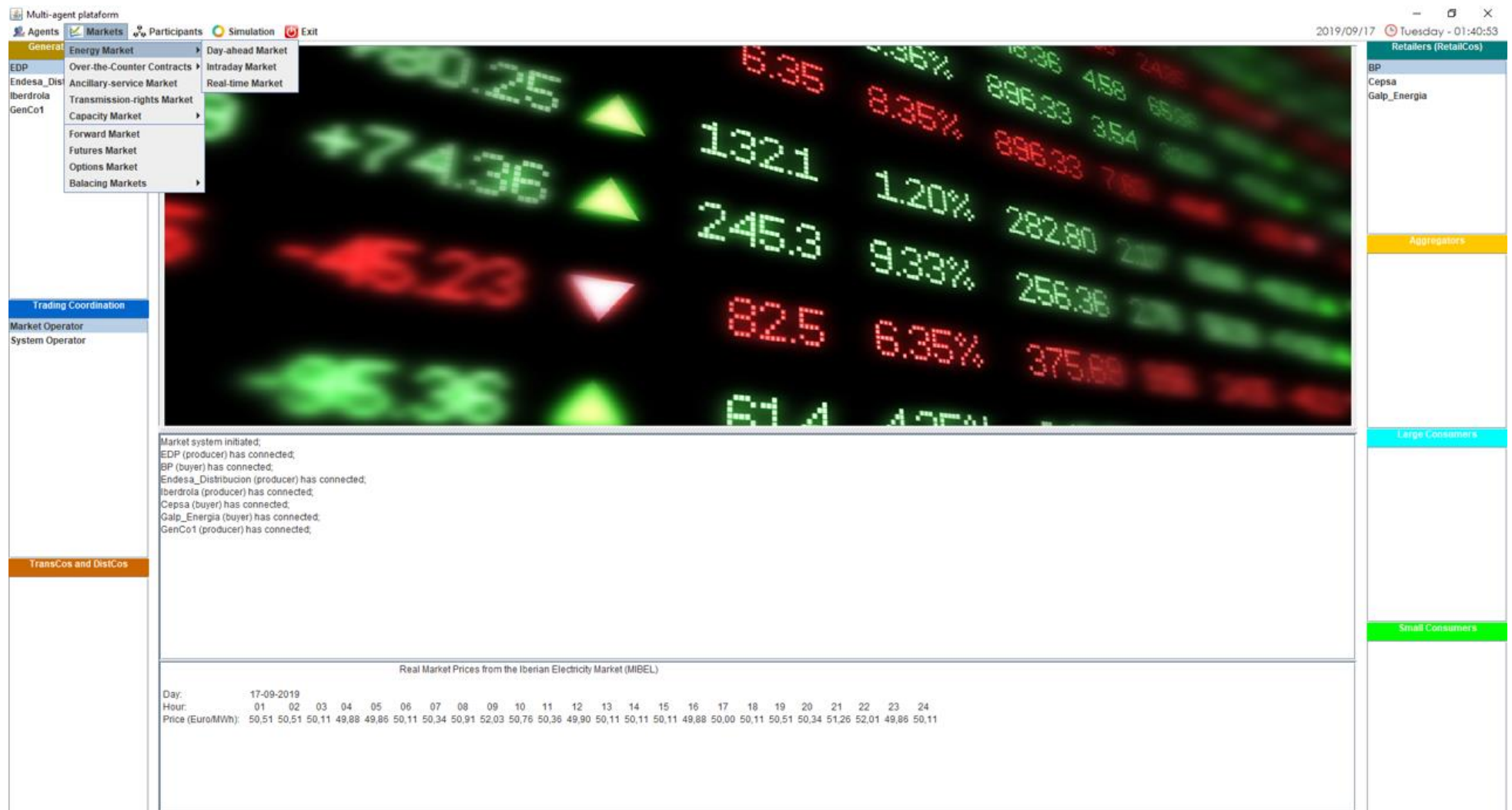


Figura 3.3 – Ilustração da interface gráfica do simulador MATREM



4 Módulo do Mercado Diário

O presente capítulo apresenta o módulo do mercado diário que foi desenvolvido no âmbito da presente dissertação, com o intuito de criar uma ferramenta que permita aos estudantes universitários efetuarem um estudo mais detalhado do funcionamento deste tipo de mercado. Será apresentada a interface gráfica do mesmo, bem como as diversas funcionalidades que este possui.

O módulo do mercado diário (MMD), é uma aplicação informática desenvolvida com o intuito de ser uma plataforma de aprendizagem para os estudantes universitários, tentando replicar a dinâmica presente no mercado diário, assim como os resultados obtidos no mesmo.

A linguagem de programação escolhida foi o Java, sendo usada a plataforma *Net-Beans IDE* para o seu desenvolvimento. De realçar, que o MMD utilizou o MATREM como base de apoio para o seu desenvolvimento, de maneira a garantir o seu bom funcionamento e representação da dinâmica do mercado diário.

4.1 Interface gráfica

A interface gráfica do módulo encontra-se escrita em inglês, de modo a que a sua utilização possa ser feita nos diversos domínios académicos ou empresariais. As imagens apresentadas nesta seção representam casos meramente exemplificativos.

Toda a interface gráfica foi desenvolvida com o objetivo de ser o mais acessível e amigável (*user friendly*) para os utilizadores, de modo a que seja possível uma fácil ambientação ao simulador por parte do utilizador.

Para uma adequada execução da simulação e obtenção de resultados, é necessário um procedimento executado de forma sequencial, a fim de configurar as diversas variáveis necessárias para o correto funcionamento do MMD.



Figura 4.1 – Ilustração da interface gráfica do módulo de mercado diário

A Figura 4.1 representa a interface gráfica principal do MMD, na qual o utilizador irá encontrar:

- Uma janela do lado direito a indicar os vendedores, *Sellers*;
- Uma janela do lado esquerdo a indicar os compradores, *Buyers*;
- Uma janela na parte inferior do módulo a descrever as ações do utilizador, como por exemplo: os participantes no mercado, os participantes criados, carregados ou apagados, entre outras ações;
- Uma barra de opções localizada na parte superior, na qual o utilizador pode aceder a quatro menus (*File*, *Participants*, *Simulation* e *Case Studies*) e um botão (*About*).

De seguida será apresentada uma descrição dos diferentes menus e funcionalidades presentes no módulo.

4.1.1 Menu Ficheiros (*File*)

Este menu permite carregar dados dos participantes salvaguardados anteriormente (*Open File*) ou gravar novos dados (*Save File*) em ficheiros *Excel*, através da janela representada na Figura 4.2.

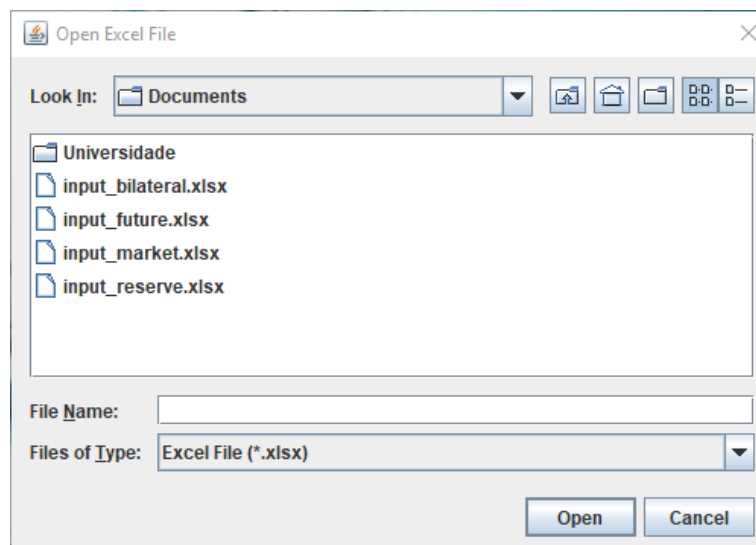


Figura 4.2 – Janela de seleção de ficheiro para guardar/carregar ficheiros

Se a opção seleccionada for a de *Open File*, serão carregados os dados guardados de um ficheiro *Excel* à escolha do utilizador. De realçar, que o módulo se encontra dotado de mecanismos de proteção de entrada de dados, nomeadamente:

- Verificação dos caracteres dos preços e volumes de energia, para garantir que as informações carregadas apenas contêm números (caso contrário o participante e a respetiva informação não serão guardadas);
- Verificação do nome do participante, de forma a garantir que cada participante tenha um nome exclusivo. Caso já exista um participante com o mesmo nome, o módulo

oferece a hipótese de escolher um novo nome, ou de não carregar o participante em questão;

- Verificação de que cada participante contém 24 entradas de preços e volumes, de forma a garantir que contém toda a informação necessária para o bom funcionamento do módulo;
- Verificação do nome das folhas do ficheiro *Excel*, para que se consiga distinguir as diferentes informações e distribuir as mesmas nas respetivas categorias.

Ao selecionar *Save File*, serão guardados os dados presentes no módulo num ficheiro *Excel*. Os dados guardados consistem no nome dos participantes, assim como os preços e as quantidades de energia que os mesmos irão disponibilizar no momento da simulação.

4.1.2 Menu *Participantes (Participants)*

Este menu permite ao utilizador criar (*New*), editar (*Edit*) ou apagar (*Delete*) participantes, ou remover todos os dados presentes no módulo (*Delete All*).

Para criar participantes (*New*), são usadas as janelas presentes na Figura 4.3. Através da janela representada na Figura 4.3 (a), é definido o nome e o tipo de participante (vendedor ou comprador). Na janela apresentada na Figura 4.3 (b) são definidos os preços (em €/MWh) e as potências (em MW) que o participante irá disponibilizar na simulação.

(a) Criação do participante

(b) Introdução dos dados do participante

Period	Price [€/MWh]	Power [MW]
0	50.0	100.0
1	50.0	100.0
2	50.0	100.0
3	50.0	100.0
4	50.0	100.0
5	50.0	100.0
6	50.0	100.0
7	50.0	100.0
8	50.0	100.0
9	50.0	100.0
10	50.0	100.0
11	50.0	100.0
12	50.0	100.0
13	50.0	100.0
14	50.0	100.0
15	50.0	100.0
16	50.0	100.0
17	50.0	100.0
18	50.0	100.0
19	50.0	100.0
20	50.0	100.0
21	50.0	100.0
22	50.0	100.0
23	50.0	100.0

(a) Criação do participante (b) Introdução dos dados do participante

Figura 4.3 – Janelas de introdução de dados para a criação de novos participantes

A opção *Edit* permite selecionar um participante para editar os preços e os volumes de energia com que irá participar na simulação. O participante a editar é escolhido através

da janela representada na Figura 4.4. Após a seleção do participante, o módulo irá abrir a janela exposta na Figura 4.3 (b) para proceder aos ajustes necessários.

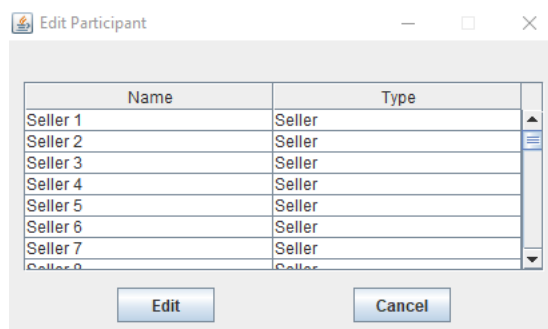


Figura 4.4 – Janela de seleção de participante a editar

A opção *Delete* permite a remoção de algum ou alguns participantes. Através desta opção é aberta a janela da Figura 4.5, na qual é possível selecionar o(s) participante(s) que se deseja eliminar.

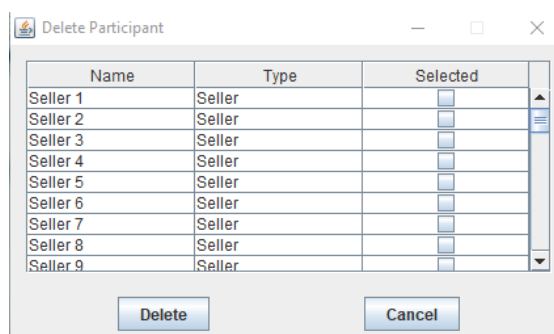


Figura 4.5 – Janela para a seleção de participantes para remover

4.1.3 Menu *Simulação (Simulation)*

Neste menu encontram-se expostas três opções: *Symmetrical*, *Asimmetrical* e *Open Simulation File*. Através das duas primeiras opções é aberta a janela representada na Figura 4.6, na qual é possível escolher os participantes que vão participar na simulação.

Na primeira opção é usado o algoritmo simétrico para executar a simulação, enquanto que na segunda opção é usado o algoritmo assimétrico. Após a escolha dos participantes, o módulo utiliza o algoritmo selecionado para efetuar a simulação. O funcionamento destes dois algoritmos encontra-se descrito na secção 2.1.1.

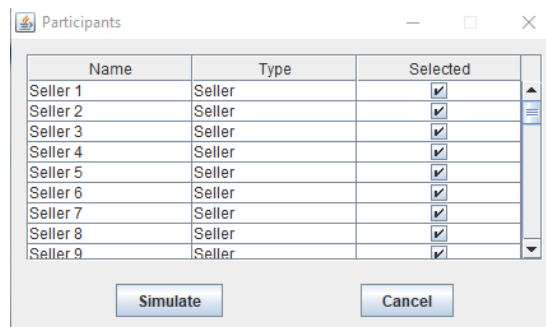


Figura 4.6 – Janela de seleção de participantes no mercado

Após correr a simulação, é aberta a janela presente na Figura 4.7, através da qual é possível consultar os dados referentes às ofertas de todos os participantes e os resultados obtidos. Os dados apresentados são: o nome do participante (*Name*), a potência disponível para venda/compra por parte do participante (*Power [MW]*), a potência transacionada no mercado pelo participante (*Traded Power [MW]*), o preço que o participante estava disposto a vender/comprar (*Price [€/MWh]*) e o preço de mercado (*Market Price [€/MWh]*). Também é possível consultar os resultados obtidos por participante ou por hora de simulação.

Name	Hour	Power[MW]	Traded Power[MW]	Price[€/MWh]	Market Price[€/MWh]
Seller 1	0	4.1	4.1	53.13	53.13
Seller 2	0	82.2	82.2	53.02	53.13
Seller 3	0	247.0	247.0	53.0	53.13
Seller 4	0	40.0	40.0	52.55	53.13
Seller 5	0	10.0	10.0	52.32	53.13
Seller 6	0	0.1	0.1	52.07	53.13
Seller 7	0	310.0	310.0	52.0	53.13
Seller 8	0	80.0	80.0	51.93	53.13
Seller 9	0	80.0	80.0	51.89	53.13
Seller 10	0	10.0	10.0	51.42	53.13
Seller 11	0	71.0	71.0	51.26	53.13
Seller 12	0	77.0	77.0	51.1	53.13
Seller 13	0	325.0	325.0	51.02	53.13
Seller 14	0	3.8	3.8	51.02	53.13
Seller 15	0	40.0	40.0	51.0	53.13
Seller 16	0	10.0	10.0	51.0	53.13
Seller 17	0	10.0	10.0	51.0	53.13
Seller 18	0	3.0	3.0	51.0	53.13
Seller 19	0	10.0	10.0	50.68	53.13
Seller 20	0	77.0	77.0	50.6	53.13
Seller 21	0	0.1	0.1	50.57	53.13
Seller 22	0	10.0	10.0	50.52	53.13
Seller 23	0	160.0	160.0	50.13	53.13
Seller 24	0	40.0	40.0	50.0	53.13
Seller 1	1	78.2	78.2	50.13	50.13
Seller 2	1	144.0	144.0	50.06	50.13

Figura 4.7 – Janela de apresentação de resultados

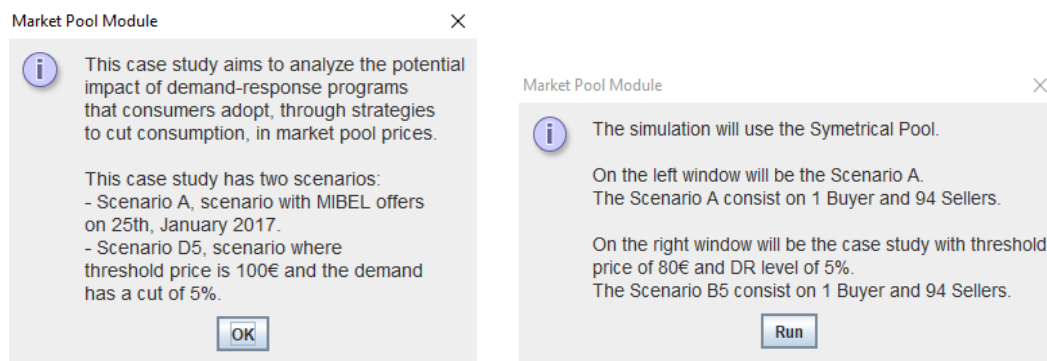
De destacar, a hipótese de guardar num ficheiro *CSV* (*Comma-separated values*) os resultados da simulação efetuada, que poderá ser lido novamente pelo módulo usando a terceira opção presente no menu *Simulation, Open Simulation File*. O ficheiro *CSV* guardado apresentará os resultados obtidos por participante, para além dos preços de mercado.

4.1.4 Menu Casos de Estudo (Case Studies)

Neste menu encontram-se expostos três casos de estudo relativos ao mercado diário, para além de uma opção de efetuar uma simulação simples com alguns dos dados de um

dos casos de estudo, com o objetivo de demonstrar o funcionamento do módulo. A implementação destes casos de estudo tem como principal objetivo ajudar o utilizador a perceber a dinâmica que este tipo de mercado apresenta.

Os casos de estudo intitulam-se: “*Impact of Wind Generation*”, “*Impact of Merit Order*” e “*Potential Impact of Load Curtailment on the Day-ahead Iberian Market: A Preliminary Analysis*”. As próximas secções apresentam uma breve descrição destes casos de estudo, para além dos resultados obtidos.



(a) Breve descrição do caso de estudo

(b) Detalhes do caso de estudo

Figura 4.8 – Janelas de introdução ao caso de estudo

De realçar, que após a seleção do caso de estudo, o MMD abre duas janelas. A primeira janela, representada na Figura 4.8 (a), apresenta uma breve descrição do caso de estudo e identifica os dois cenários que serão apresentados. A segunda janela, apresentada na Figura 4.8 (b), apresenta alguns dos detalhes da simulação, nomeadamente o algoritmo usado para a definição dos preços e volumes, os participantes, e a janela relativa a cada cenário é apresentada. De seguida são abertas duas janelas idênticas à da Figura 4.7, em que a parte da esquerda apresenta o cenário base enquanto que a da direita apresenta os resultados obtidos.

4.1.4.1 Caso de Estudo I

Este caso de estudo, intitulado “*Impact of Wind Generation*”, procura demonstrar ao utilizador o impacto que a geração eólica tem na definição dos preços praticados no mercado. Considera dois cenários distintos:

- Cenário I – Os produtores eólicos participam na sessão;
- Cenário II – Os produtores eólicos não participam na sessão.

Os preços de mercado obtidos nos dois cenários encontram-se presentes na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Impacto da geração eólica no preço de mercado

Hora	Cenário I (€/MWh)	Cenário II (€/MWh)	Hora	Cenário I (€/MWh)	Cenário II (€/MWh)
00	29,00	51,02	12	58,25	60,09
01	30,00	49,72	13	46,20	60,24
02	0,00	37,08	14	48,20	55,00
03	0,00	36,26	15	39,40	57,88
04	0,00	35,02	16	42,66	48,62
05	26,47	49,26	17	46,63	55,00
06	26,80	49,72	18	53,54	54,32
07	20,25	51,89	19	53,54	53,70
08	23,00	37,08	20	48,58	57,88
09	25,25	55,00	21	52,62	58,20
10	28,00	60,09	22	43,02	49,03
11	35,00	60,09	23	35,18	42,18

Ao analisar os dados apresentados na Tabela 4.1 é possível verificar que os preços do Cenário I são mais baixos que os do Cenário II, sendo possível concluir que a presença de energia eólica no mercado tende a diminuir os preços praticados, resultando num maior benefício para os compradores/consumidores de energia elétrica. De realçar, que este caso de estudo serve essencialmente para demonstrar ao utilizador um exemplo simples de como a presença de produtores de energia renovável no mercado pode ser benéfica para todos os participantes.

4.1.4.2 Caso de Estudo II

Este caso de estudo, intitulado “*Effect of Merit Order*” [51], procura ilustrar o efeito da ordem de mérito tendo em conta a produção eólica em Portugal. O efeito da ordem de mérito consiste numa deslocação para a direita da curva da oferta, devido a uma comercialização elevada de energia renovável (cujas ofertas entram na parte inferior da curva da oferta), fazendo com que o preço de mercado logre uma redução considerável [3].

Os dados usados para este caso de estudo são os dados reais relativos às ofertas submetidos ao MIBEL no dia 6 de janeiro de 2017. São definidos 2 cenários distintos:

- Cenário I – Mercado com a presença de produtores de energia renovável;
- Cenário II – Mercado sem a presença de produtores de energia renovável.

Os preços de mercado para os dois cenários obtidos no MMD encontram-se presentes na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Efeito da ordem de mérito nos preços

Hora	Cenário I (€/MWh)	Cenário II (€/MWh)	Hora	Cenário I (€/MWh)	Cenário II (€/MWh)
00	59,58	74,11	12	71,51	75,00
01	53,98	70,69	13	70,99	74,82
02	52,07	67,59	14	68,53	72,49
03	48,10	61,10	15	65,62	70,98
04	46,74	58,78	16	66,21	72,15
05	48,40	60,23	17	70,55	75,00
06	53,27	67,59	18	73,87	78,28
07	60,15	72,51	19	74,69	79,59
08	63,10	72,51	20	75,10	81,01
09	66,21	73,69	21	75,10	82,02
10	70,55	75,00	22	73,87	78,53
11	71,00	75,00	23	71,69	77,00

Ao analisar os preços apresentados na Tabela 4.2 é possível verificar que os preços do Cenário I são mais baixos em comparação com os preços do Cenário II.

4.1.4.3 Caso de estudo III

Este caso de estudo, intitulado “*Potential Impact of Load Curtailment on the Day-ahead Iberian Market: A Preliminary Analysis*” [52], procura analisar o impacto dos programas de gestão da procura que os consumidores adotam, nomeadamente através de estratégias de corte de consumo, nos preços do mercado diário. Os dados utilizados são os dados reais submetidos no MIBEL no dia 25 de janeiro de 2017.

Este caso de estudo envolve quatro cenários:

- Cenário A, com os dados das ofertas submetidas no MIBEL;
- Cenário B, em que existe um corte a partir dos 80€/MWh;
- Cenário C, em que existe um corte a partir dos 90€/MWh;
- Cenário D, em que existe um corte a partir dos 100€/MWh.

Os números que se encontram-se a frente da letra que identifica o cenário indicam a percentagem do corte (1, 3 e 5).

Através destes cenários é possível analisar os impactos provocados pelos diversos cortes nos preços praticados no mercado. Os resultados obtidos a partir dos Cenários A e B encontram-se presentes na Tabela 4.3. Os restantes resultados encontram-se na Tabela A.1 do Anexo A.

Tabela 4.3 – Preços de mercado no Cenário A e Cenário B

Hora	Cenários (€/MWh)				Hora	Cenários (€/MWh)			
	A	B1	B3	B5		A	B1	B3	B5
00	97,70	97,10	95,50	90,00	12	96,50	95,00	90,00	85,00
01	85,03	85,00	80,00	80,00	13	96,00	95,00	90,00	85,00
02	79,58	79,58	79,58	79,58	14	89,23	89,23	85,00	80,00
03	76,80	76,80	76,80	76,80	15	88,00	85,00	85,00	80,00
04	75,25	75,25	75,25	75,25	16	86,75	85,00	85,00	80,00
05	76,10	76,10	76,10	76,10	17	93,21	90,00	85,00	85,00
06	80,10	80,10	80,10	75,00	18	99,18	98,61	97,70	95,65
07	94,00	90,00	90,00	85,00	19	101,70	101,00	99,60	98,61
08	98,01	97,20	95,00	90,00	20	101,99	101,99	100,67	99,28
09	98,61	98,19	96,50	95,00	21	100,67	100,20	99,18	98,20
10	98,61	98,19	96,50	95,00	22	99,18	98,61	97,70	96,19
11	97,35	96,50	95,00	85,00	23	96,19	95,00	95,00	95,00

Ao analisar os dados obtidos com o MMD, e em especial os dados da Tabela 4.3, é possível concluir que os consumidores devem ser encorajados a participarem em programas de gestão da procura, pois os resultados obtidos com cortes relativamente baixos (1, 3 e 5%) provocam uma queda substancial nos preços praticados no mercado, o que pode resultar num aumento da poupança dos consumidores/compradores de energia elétrica.



5 Módulo do Mercado de Reservas

O presente capítulo apresenta o módulo do mercado de reservas que foi desenvolvido no âmbito da presente dissertação, com o intuito de criar uma ferramenta que permita aos estudantes universitários efetuarem um estudo mais detalhado do funcionamento deste tipo de mercado. Será apresentada a sua interface gráfica, bem como as diversas funcionalidades que este possui.

O módulo do mercado de reservas (MMR), é uma aplicação informática desenvolvida com o intuito de ser uma plataforma de aprendizagem para os estudantes universitários, tentando replicar a dinâmica presente no mercado de reservas e os resultados obtidos no mercado de reservas secundário (MRS) e do mercado de reservas terciário (MRT).

A linguagem de programação escolhida foi o Java, sendo usada a plataforma *NetBeans IDE* para o desenvolvimento do MMR. De realçar, que o MMR utilizou o MATREM como base de apoio para o seu desenvolvimento, de maneira a garantir o seu bom funcionamento e representação da dinâmica existente no mercado de reservas.

5.1 Interface gráfica



Figura 5.1 – Ilustração da interface gráfica do módulo de mercado de reservas

A interface gráfica do MMR encontra-se escrita em inglês, para que a sua utilização possa ser feita nos mais diversos domínios. As imagens apresentadas ao longo deste capítulo funcionam como casos meramente exemplificativos.

Toda a interface gráfica foi desenvolvida com a finalidade de ser o mais acessível e amigável (*user friendly*) para todos os utilizadores, de forma a proporcionar uma fácil ambientação à ferramenta.

Para realizar uma simulação é necessário proceder a um conjunto de procedimentos executados de forma sequencial, incluindo a criação dos participantes e respetivas unidades de produção, as ofertas a submeter por parte de cada unidade, e finalmente a simulação e análise dos resultados obtidos.

Na Figura 5.1 encontra-se representada a interface gráfica principal do MMR, na qual é possível encontrar:

- Uma janela do lado direito a indicar os participantes no mercado, *Sellers*;
- Uma janela na parte inferior do módulo a descrever as ações que ocorrem no MMR, nomeadamente o carregamento de dados nos ficheiros *Excel*, a criação, edição ou remoção de participantes, as unidades que participam nas diferentes simulações, entre outras ações;
- Uma barra de menus localizada na parte superior, permitindo o acesso aos diferentes menus (*File*, *Participants*, *Simulation* e *Case Studies*) e a um botão (*About*).

De seguida, será apresentada uma descrição dos diferentes menus e funcionalidades presentes no MMR.

5.1.1 Menu Ficheiros (*File*)

Este menu permite carregar dados guardados em ficheiros *Excel* relativos a simulações realizadas anteriormente (*Open File*), guardar os dados presentes no MMR em ficheiros (*Save File*), guardar um ficheiro modelo das necessidades secundárias e terciárias (*Save Secondary Needs Template* e *Save Tertiary Needs Template*, respetivamente) e carregar novos dados gravados em ficheiros relativos às necessidades dos mercados de reservas secundárias e terciárias (*Open New Secondary Needs* e *Open New Tertiary Needs*, respetivamente), através da janela representada na Figura 4.2.

Ao seleccionar *Open File*, o módulo carrega os dados guardados no ficheiro escolhido. De realçar, que o módulo se encontra dotado de mecanismos de proteção de entrada de dados, nomeadamente:

- Verificação dos caracteres, de forma a garantir que a informação relativa aos preços e potências de cada central apenas contem números e 24 entradas (caso contrário a informação da central em causa não será carregada);
- Verificação do nome do participante e das respetivas centrais, de maneira a garantir que cada participante e respetivas centrais tenham um nome exclusivo. Caso se verifique a existência de dois participantes ou duas centrais com o mesmo nome, o módulo oferece ao utilizador a hipótese de renomear o participante ou a central. Caso o utilizador não o queira efetuar, a informação relativa ao mesmo/mesma não será carregada;
- Verificação do nome das folhas do ficheiro, de forma a que se consiga distinguir as diferentes informações e distribuir as mesmas nas respetivas categorias, para forma a garantir que o módulo funciona sem problemas.

De realçar, que ao iniciar o MMR, este irá carregar automaticamente a informação presente em dois ficheiros. O primeiro ficheiro, *Secondary_Needs.xlsx*, contém as necessidades do MRS, enquanto que o segundo ficheiro, *Tertiary_Needs.xlsx*, contém as informações relativas as necessidades do MRT.

Para salvaguardar os dados dos participantes presentes no MMR num ficheiro *Excel*, o utilizador seleciona *Save File*. Os dados guardados consistem nos nomes dos participantes, assim como os preços e volumes de energia relativos a cada central.

Se as opções selecionadas forem as de *Save Secondary Needs Template* ou *Save Tertiary Needs Template*, o MMR cria um ficheiro modelo, onde o utilizador pode completar a informação relativa as necessidades do sistema.

Ao selecionar *Open New Secondary Needs* ou *Open New Tertiary Needs*, o MMR redefine as necessidades do MRS ou MRT ao carregar o ficheiro selecionado.

5.1.2 Menu Participantes (*Participants*)

Este menu permite criar (*New*), editar (*Edit*) ou apagar participantes (*Delete*), sendo também possível apagar todos os dados presentes no módulo (*Delete All*).

Através da opção *New*, o utilizador passará por uma sequência de janelas de forma a criar um participante, assim como as respetivas centrais que serão utilizadas nas diferentes simulações. Em primeiro lugar, o utilizador define o nome do participante usando a janela reproduzida na Figura 5.2.

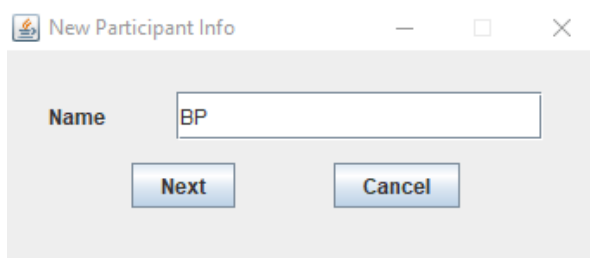
The image shows a software dialog box titled "New Participant Info". It has a standard Windows-style title bar with a minimize button, a maximize button (disabled), and a close button. The main area of the dialog contains a label "Name" followed by a text input field. The input field contains the text "BP". Below the input field, there are two buttons: "Next" and "Cancel". The "Next" button is highlighted with a blue border and shadow, indicating it is the default action.

Figura 5.2 – Janela de definição de nome do participante

Após a validação do nome, por parte do módulo, é aberta a janela exposta na Figura 5.3. Através desta janela, o utilizador pode criar (*Add*), remover (*Remove*) ou editar (*Update*) as centrais do participante.

The 'Add Generator' window is divided into two main sections. The top section, 'GenCo's Info', contains a 'Name' field with the value 'BP'. The bottom section, 'Technology Portfolio', features a table with columns 'ID', 'Technology', 'Fuel', and 'Scheduling Model'. To the right of the table are 'Add', 'Remove', and 'Update' buttons. At the bottom of the window are 'Save' and 'Cancel' buttons.

Figura 5.3 – Janela de introdução, edição e remoção de centrais do participante

Para criar uma nova central, em primeiro lugar é usada a janela apresentada na Figura 5.4 (a), na qual o utilizador define o nome, o tipo de central (térmica, hídrica ou eólica), o tipo de combustível (carvão, petróleo, gás natural, água ou vento) e o tipo de mercado no qual a central vai participar (secundário ou terciário).

Two windows are shown side-by-side. The left window, 'Preliminar Info', has a 'Unit Data' section with fields for 'Unit Identification', 'Production Technology', 'Fuel Type', and 'Scheduling Model', along with 'Next' and 'Cancel' buttons. The right window, 'Producer Unit Offer', has a 'Producer Unit's Info' section with 'Name' (Tertiary1) and 'Scheduling Model' (Tertiary) fields. Below is an 'Offers' table with columns 'Period', 'Price (€/MW)', and 'Power (MW)'. The table contains 24 rows of data, all with a price of 50.0 and power of 500.0. At the bottom are 'Back', 'Done', and 'Cancel' buttons.

Period	Price (€/MW)	Power (MW)
0	50.0	500.0
1	50.0	500.0
2	50.0	500.0
3	50.0	500.0
4	50.0	500.0
5	50.0	500.0
6	50.0	500.0
7	50.0	500.0
8	50.0	500.0
9	50.0	500.0
10	50.0	500.0
11	50.0	500.0
12	50.0	500.0
13	50.0	500.0
14	50.0	500.0
15	50.0	500.0
16	50.0	500.0
17	50.0	500.0
18	50.0	500.0
19	50.0	500.0
20	50.0	500.0
21	50.0	500.0
22	50.0	500.0
23	50.0	500.0

(a) Definição dos parâmetros das unidades

(b) Definição dos preços e volumes

Figura 5.4 – Janelas de introdução dos dados para a criação de novas unidades

Mais uma vez, após validação de todos os dados por parte do módulo, a janela exposta na Figura 5.4 (b) será aberta. Nesta janela são definidos os preços e os volumes de energia que a central apresentará na simulação.

A opção *Edit* permite selecionar um participante e editar a informação relativa às suas centrais. Para tal, é aberta uma janela idêntica à que se encontra presente na Figura 4.4. Após selecionar o participante a editar é aberta a janela exibida na Figura 5.3.

Através da opção *Delete* é possível a remoção de participantes. Através de uma janela idêntica a que se encontra representada Figura 4.5, seleciona-se o(s) participante(s) que se pretende apagar.

5.1.3 Menu Simulação (Simulation)

Neste menu encontram-se expostas quatro opções: *Secondary* e *Tertiary Reserve Market*, *Clear All Simulations* e *Open Simulation File*. As duas primeiras opções permitem a realização de simulações do MRS e MRT, respetivamente.

Para realizar a simulação, em primeiro lugar, através da janela representada na Figura 5.5, são definidas as unidades que participam na simulação.

Selected	ID	Technology	Fuel
<input type="checkbox"/>	Hydro 1	Hydro	Water
<input type="checkbox"/>	Hydro 4	Hydro	Water
<input type="checkbox"/>	Hydro 5	Hydro	Water
<input type="checkbox"/>	Hydro 6	Hydro	Water
<input type="checkbox"/>	Hydro 7	Hydro	Water
<input type="checkbox"/>	Hydro 8	Hydro	Water
<input type="checkbox"/>	Thermal 4	Thermal	Natural Gas
<input type="checkbox"/>	Thermal 5	Thermal	Oil
<input type="checkbox"/>	Thermal 6	Thermal	Oil
<input type="checkbox"/>	Thermal 7	Thermal	Oil
<input type="checkbox"/>	Hydro 2	Hydro	Water

Figura 5.5 – Janela de seleção das centrais a participarem no mercado

Após a seleção das centrais a participarem, são definidos os preços e as bandas de regulação. O valor da banda de regulação a subir é o valor definido anteriormente pelo utilizador na janela ilustrada na Figura 5.4 (b). A banda de regulação a descer apresenta metade do valor da banda de regulação a subir, respeitando o rácio definido pelo Gestor Global de Sistema. Através da janela representada na Figura 5.6, definem-se os preços e as bandas de regulação que cada central vai apresentar no momento da simulação.

Generator Unit Offers

Name: EDP - Hydro 1

Hour	Price [€/MWh]	Power [MW]	Hour	Price [€/MWh]	Power [MW]	Hour	Price [€/MWh]	Power [MW]
00	3.39	[-40.5 ; 81.0]	08	14.88	[-40.5 ; 81.0]	16	6.85	[-91.1 ; 182.2]
01	0.00	[0.0 ; 0.0]	09	12.80	[-40.5 ; 81.0]	17	11.40	[-41.1 ; 82.2]
02	0.00	[0.0 ; 0.0]	10	6.76	[-40.5 ; 81.0]	18	23.94	[-60.0 ; 120.1]
03	0.00	[0.0 ; 0.0]	11	13.81	[-40.5 ; 81.0]	19	15.69	[-40.5 ; 81.0]
04	0.00	[0.0 ; 0.0]	12	8.78	[-40.5 ; 81.0]	20	21.81	[-40.5 ; 81.0]
05	0.00	[0.0 ; 0.0]	13	13.23	[-40.5 ; 81.0]	21	20.56	[-40.5 ; 81.0]
06	5.19	[-96.2 ; 192.3]	14	11.53	[-40.5 ; 81.0]	22	15.29	[-40.5 ; 81.0]
07	10.12	[-58.1 ; 116.2]	15	12.34	[-75.4 ; 150.9]	23	0.00	[0.0 ; 0.0]

Save Update Cancel

Figura 5.6 – Janela de definição das ofertas da banda de regulação de uma central

Após a seleção de todas as unidades que vão participar na simulação, o módulo corre o algoritmo do mercado escolhido, sendo que as janelas ilustradas nas Figuras 5.7 e 5.8 são referentes ao MRS, enquanto que as janelas representadas nas Figuras 5.9 e 5.10 são referentes a simulação do MRT.

Secondary Reserve Market

Hour: 0 System Down Needs [MW]: -145.0 System Up Needs [MW]: 290.0

Regulation Offers				Market Result			
Participant	Power Down [MW]	Power Up [MW]	Price [€/MW]	Hour	Power Down [MW]	Power Up [MW]	System Marginal Price [€/MW]
EDP - Hydro 1	-40.5	81.0	3.39	0	-95.0	278.4	5.07
EDP - Thermal 5	-54.5	109.0	5.02	1	-135.0	271.0	9.72
EDP - Hydro 5	-44.2	88.4	5.07	2	-124.0	248.0	3.57
EDP - Thermal 4	-69.5	139.0	5.96	3	-109.0	218.0	8.84
				4	-103.0	206.0	3.03
				5	-44.2	180.1	9.8
				6	-109.0	219.0	8.55
				7	-124.0	248.0	11.19
				8	-147.0	294.0	10.57
				9	-132.0	264.0	12.06
				10	-136.0	273.0	10.36
				11	-54.5	248.0	8.85
				12	-130.0	261.0	12.78
				13	-131.0	263.0	13.23
				14	-133.0	266.0	11.53
				15	-124.0	249.0	12.34
				16	-123.0	246.0	7.81
				17	-125.0	251.0	11.58
				18	-142.0	284.0	23.56
				19	-153.0	307.0	24.33
				20	-69.5	248.0	21.47
				21	-95.0	278.4	22.19
				22	-127.0	254.0	23.36
				23	-98.7	336.4	24.53

Continue

Figura 5.7 – Janela de resultados do MRS

Na janela representada na Figura 5.7, encontra-se presente uma simulação do MRS. As necessidades da banda encontram-se representadas na parte superior da janela, sendo que o cálculo destas é efetuado para todas as horas através da Equação 2.1. As bandas contratadas devem apresentar um valor de $\pm 5\%$ da banda necessária calculada. A tabela *Regulation Offers* apresenta, por cada hora, as ofertas dos participantes por unidade física, discriminada por ordem crescente de preço. A tabela *Market Result* apresenta os resultados do conjunto das necessidades do sistema com as bandas de potência oferecidas.

Hour	Power Down [MW]	Power Up [MW]	Clearing Price (€/MW)
0	-95.0	278.4	5.07
1	-135.0	271.0	9.72
2	-124.0	248.0	3.57
3	-109.0	218.0	8.84
4	-103.0	206.0	3.03
5	-44.2	180.1	9.8
6	-109.0	219.0	8.55
7	-124.0	248.0	11.19
8	-147.0	294.0	10.57
9	-132.0	264.0	12.06
10	-136.0	273.0	10.36
11	-54.5	248.0	8.85
12	-130.0	261.0	12.78
13	-131.0	263.0	13.23
14	-133.0	266.0	11.53
15	-124.0	249.0	12.34
16	-123.0	246.0	7.81
17	-125.0	251.0	11.58
18	-142.0	284.0	23.56
19	-153.0	307.0	24.33
20	-69.5	248.0	21.47
21	-95.0	278.4	22.19
22	-127.0	254.0	23.36
23	-98.7	336.4	24.53

Figura 5.8 – Janela de apresentação de resultados dos participantes do MRS

Após a visualização dos resultados iniciais, é aberta a janela representada na Figura 5.8, onde é possível consultar os resultados da simulação em diferentes tabelas. Todos os resultados obtidos podem ser consultados por hora e/ou por unidade. De realçar, a hipótese de guardar os resultados obtidos num ficheiro, os quais podem ser carregados posteriormente através da opção *Open Simulation File*. Este ficheiro contém os resultados obtidos na simulação, os dados necessários para obter os mesmos resultados, nomeadamente a informação de todos os participantes e das necessidades do sistema.

Participant Unit	Power [MW]	Price [€/MWh]
EDP - Hydro 2	406.2	58.68
EDP - Thermal 6	181.0	60.3
EDP - Hydro 3	306.6	70.04

Hour	Energy [MWh]	System Marginal Price [€/MWh]
0	0.0	0.0
1	158.1	58.68
2	0.0	0.0
3	4.6	52.44
4	0.0	0.0
5	0.0	0.0
6	0.0	0.0
7	0.0	0.0
8	0.0	0.0
9	0.0	0.0
10	0.0	0.0
11	0.0	0.0
12	0.0	0.0
13	203.9	58.68
14	870.5	70.04
15	1013.3	70.04
16	1023.9	70.04
17	1033.0	70.04
18	1037.3	70.04
19	1049.0	70.04
20	556.4	70.04
21	0.0	0.0
22	219.5	70.04
23	226.3	58.68

Figura 5.9 – Janela de resultados do MRT

Outra das capacidades presentes no MMR consiste na possibilidade de efetuar uma simulação do MRT usando os resultados obtidos no MRS, de forma a complementar os resultados obtidos no MRT. Na Figura 5.9, encontra-se ilustrada uma janela com os resultados obtidos numa simulação do MRT.

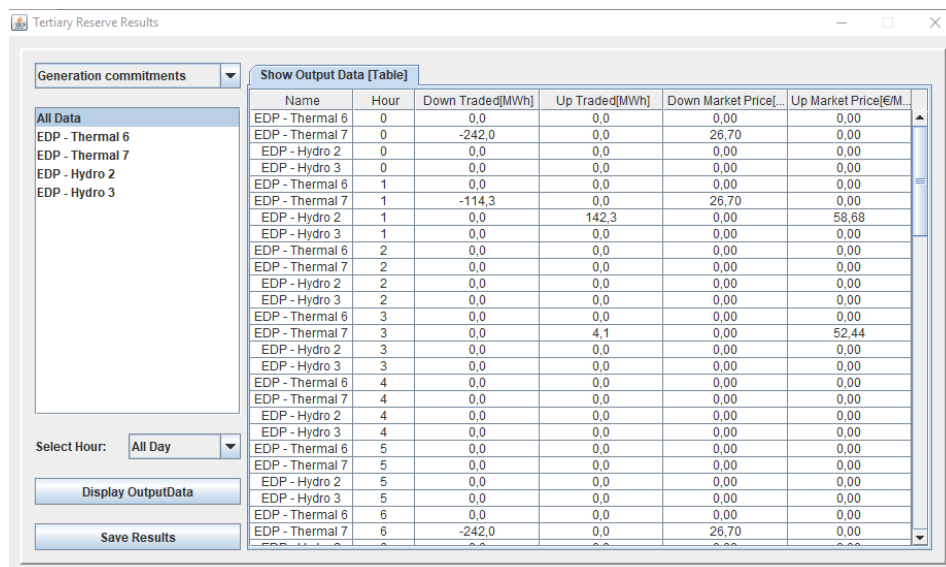
As necessidades horárias do MRT, identificadas na parte superior da janela exposta na Figura 5.9, são calculadas a partir dos dados carregados anteriormente. Os dados disponíveis encontram-se divididos em períodos de 15 minutos, permitindo assim que o MMR calcule os desvios na rede para de seguida agrupar os dados por hora e por consequência calcular as bandas de regulação a subir e a descer. Para obter os desvios para cada período de 15 minutos o MMR utiliza a Equação 5.1.

$$D = - \frac{PC_{Pt} - (C_{Pt} + SIE_{Pt}) + (PE_{Pt} - FPE_{Pt})}{4} \quad \text{Equação 5.1}$$

onde:

- D é o desvio na rede, em MWh;
- PC_{Pt} é a potência contratada em mercado em bolsa em Portugal, em MW;
- C_{Pt} é o consumo em Portugal, em MW;
- SIE_{Pt} é o saldo de importação e exportação de Portugal, em MW;
- PE_{Pt} é a produção eólica em Portugal, em MW;
- FPE_{Pt} é a previsão da produção eólica em Portugal, em MW;

As somas dos desvios superiores a zero, por hora, formam as necessidades de regulação a subir, enquanto que a soma dos desvios inferiores a zero, por hora, formam as necessidades de regulação a descer.



The screenshot shows a software window titled 'Tertiary Reserve Results'. It contains a table with columns: Name, Hour, Down Traded[MWh], Up Traded[MWh], Down Market Price[€/MWh], and Up Market Price[€/MWh]. The table lists data for various EDP units (Thermal and Hydro) across 6 hours. The 'All Data' tab is selected on the left, and the 'Show Output Data [Table]' button is active. Below the table, there are buttons for 'Display Output Data' and 'Save Results', and a 'Select Hour' dropdown menu set to 'All Day'.

Name	Hour	Down Traded[MWh]	Up Traded[MWh]	Down Market Price[€/MWh]	Up Market Price[€/MWh]
EDP - Thermal 6	0	0,0	0,0	0,00	0,00
EDP - Thermal 7	0	-242,0	0,0	26,70	0,00
EDP - Hydro 2	0	0,0	0,0	0,00	0,00
EDP - Hydro 3	0	0,0	0,0	0,00	0,00
EDP - Thermal 6	1	0,0	0,0	0,00	0,00
EDP - Thermal 7	1	-114,3	0,0	26,70	0,00
EDP - Hydro 2	1	0,0	142,3	0,00	58,68
EDP - Hydro 3	1	0,0	0,0	0,00	0,00
EDP - Thermal 6	2	0,0	0,0	0,00	0,00
EDP - Thermal 7	2	0,0	0,0	0,00	0,00
EDP - Hydro 2	2	0,0	0,0	0,00	0,00
EDP - Hydro 3	2	0,0	0,0	0,00	0,00
EDP - Thermal 6	3	0,0	0,0	0,00	0,00
EDP - Thermal 7	3	0,0	4,1	0,00	52,44
EDP - Hydro 2	3	0,0	0,0	0,00	0,00
EDP - Hydro 3	3	0,0	0,0	0,00	0,00
EDP - Thermal 6	4	0,0	0,0	0,00	0,00
EDP - Thermal 7	4	0,0	0,0	0,00	0,00
EDP - Hydro 2	4	0,0	0,0	0,00	0,00
EDP - Hydro 3	4	0,0	0,0	0,00	0,00
EDP - Thermal 6	5	0,0	0,0	0,00	0,00
EDP - Thermal 7	5	0,0	0,0	0,00	0,00
EDP - Hydro 2	5	0,0	0,0	0,00	0,00
EDP - Hydro 3	5	0,0	0,0	0,00	0,00
EDP - Thermal 6	6	0,0	0,0	0,00	0,00
EDP - Thermal 7	6	-242,0	0,0	26,70	0,00

Figura 5.10 – Janela de apresentação de resultados dos participantes do MRT

Após a obtenção das necessidades do sistema, o MMR define as ofertas do MRT necessárias para as colmatar. As tabelas presentes na janela representada na Figura 5.9 adaptam-se consoante o tipo de regulação que o utilizador deseja consultar. De realçar, que o MMR foi implementado para que 90% das necessidades das reservas sejam colmatadas pela reserva terciária, sendo os restantes 10% colmatados pela reserva secundária.

Através da janela exposta na Figura 5.10 é possível ver os resultados das necessidades do sistema, das bandas contratadas, os preços a pagar por banda de regulação, as receitas/custos e o lucro obtido por unidade. Todos estes resultados são possíveis de serem consultados por hora ou por unidade. De realçar, novamente, a hipótese de salvar os resultados obtidos num ficheiro, que poderá ser carregado novamente através da opção *Open Simulation File*. A opção *Clear All Simulations*, limpa todos os dados relativos às simulações efetuadas.

5.1.4 Menu Casos de Estudo (Case Studies)

Neste menu encontram-se expostos dois casos de estudo relativos ao mercado de reservas. A implementação destes casos de estudo, intitulados “*Secondary Reserve Case Study*” e “*Tertiary Reserve Case Study*”, têm como principal objetivo ajudar o utilizador a perceber a dinâmica deste tipo de mercado. As próximas secções apresentam uma breve descrição destes casos de estudo.

De realçar, que após a seleção dos dados necessários para correr cada caso de estudo, o MMR abre duas janelas que fazem uma breve descrição do caso em questão e identificam os participantes e as respetivas centrais que o utilizador definiu para participarem nele. Estas janelas são idênticas às que se encontram representadas na Figura 4.8.

5.1.4.1 Caso de estudo I

Este caso de estudo, intitulado “*Secondary Reserve Case Study*”, procura analisar os preços de mercado quando são adicionados 10 participantes com ofertas “fixas”, isto é, a potência e respetivo preço constantes ao longo do dia, à oferta definida pelo utilizador. Os dados destas ofertas “fixas” encontram-se presentes na Tabela 5.1.

Como referido anteriormente, em primeiro lugar, o utilizador define uma oferta com os participantes e as respetivas centrais existentes no MMR, usando as janelas ilustradas nas Figuras 5.5 e 5.6. Os dados das centrais dos participantes usados para obter os resultados apresentados na Tabela B.5 do Anexo B, encontram-se identificados nas Tabelas B1-B3 do Anexo B. As necessidades do sistema encontram-se identificadas na Tabela B.4, presente no Anexo B sendo iguais para os dois cenários.

Tabela 5.1 – Participantes “fixos” presentes no caso de estudo

Participante	Potência (MW)	Preço (€/MWh)	Participante	Potência (MW)	Preço (€/MWh)
<i>Seller 1</i>	230,0	12,50	<i>Seller 6</i>	20,0	6,00
<i>Seller 2</i>	62,0	20,50	<i>Seller 7</i>	30,0	21,00
<i>Seller 3</i>	108,0	25,70	<i>Seller 8</i>	40,0	37,00
<i>Seller 4</i>	196,0	30,35	<i>Seller 9</i>	50,0	18,00
<i>Seller 5</i>	2,0	10,00	<i>Seller 10</i>	60,0	10,00

Na Tabela 5.2, encontram-se presentes os resultados obtidos no caso de estudo, e após comparação com os resultados obtidos sem a participação dos participantes “fixos”, é possível chegar a conclusão que a participação destes participantes ajudou a melhorar os resultados obtidos, pois as bandas contratadas apresentam valores mais próximos das bandas necessárias calculadas. Este fator leva a uma redução de alguns dos preços, levando a que o operador de rede obtenha uma maior poupança neste tipo de mercado.

Tabela 5.2 – Resultados do caso de estudo

Hora	Potência (MW)		Preço (€/MWh)	Hora	Potência (MW)		Preço (€/MWh)
	Descer	Subir			Descer	Subir	
00	-95,00	278,40	5,07	12	-105,00	270,00	10,00
01	-135,00	271,00	9,72	13	-131,00	263,00	12,50
02	-124,00	248,00	3,57	14	-79,50	268,00	9,31
03	-109,00	218,00	8,84	15	-124,00	249,00	12,34
04	-103,00	206,00	3,03	16	-123,00	246,00	7,81
05	-94,00	188,00	9,80	17	-125,00	251,00	11,40
06	-96,20	212,30	6,00	18	-142,00	284,00	12,50
07	-124,00	248,00	10,25	19	-41,00	312,00	12,50
08	-123,70	307,40	10,00	20	-125,00	250,00	12,50
09	-132,00	264,00	10,00	21	-134,00	268,00	12,50
10	-105,00	270,00	10,00	22	-127,00	254,00	12,50
11	-126,00	252,00	8,85	23	-171,00	342,00	18,00

5.1.4.2 Caso de estudo II

Este caso de estudo, intitulado “*Tertiary Reserve Case Study*”, sendo idêntico ao caso de estudo anterior, na medida que este também procura analisar os preços de mercado quando são introduzidos 10 participantes com ofertas “fixas” à oferta definida pelo utilizador. Os dados destes participantes “fixos” encontram-se identificados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Participantes “fixos” presentes no caso de estudo

Participante	Potência (MW)	Preço (€/MWh)	Participante	Potência (MW)	Preço (€/MWh)
<i>Seller 1</i>	60,00	12,50	<i>Seller 6</i>	-60,00	12,50
<i>Seller 2</i>	31,00	20,50	<i>Seller 7</i>	-31,00	20,50
<i>Seller 3</i>	54,00	25,70	<i>Seller 8</i>	-54,00	25,70
<i>Seller 4</i>	98,00	30,35	<i>Seller 9</i>	-80,00	30,35
<i>Seller 5</i>	1,00	10,00	<i>Seller 10</i>	-1,00	10,00

Tabela 5.4 – Resultados do mercado com os participantes “fixos”

Hora	Energia a Subir (MWh)	Preço (€/MWh)	Energia a Descer (MWh)	Preço (€/MWh)
00	0,00	0,00	-529,40	10,00
01	158,10	25,70	-127,00	26,70
02	0,00	0,00	-289,10	10,00
03	4,60	12,50	-24,20	30,35
04	0,00	0,00	-73,30	30,35
05	0,00	0,00	-261,50	10,00
06	0,00	0,00	-450,10	20,50
07	0,00	0,00	-171,30	26,70
08	0,00	0,00	-562,20	10,00
09	0,00	0,00	-979,20	10,00
10	0,00	0,00	-548,50	10,00
11	0,00	0,00	-128,40	26,70
12	0,00	0,00	-134,20	26,70
13	203,90	30,35	0,00	0,00
14	870,50	60,30	0,00	0,00
15	1194,70	70,04	0,00	0,00
16	1267,90	70,04	0,00	0,00
17	1277,00	70,04	0,00	0,00
18	1281,30	70,04	0,00	0,00
19	1293,00	70,04	0,00	0,00
20	687,90	70,04	0,00	0,00
21	0,00	0,00	-115,50	38,14
22	219,50	30,35	0,00	0,00
23	226,30	30,35	0,00	0,00

Como referido anteriormente, o funcionamento deste caso de estudo é semelhante ao caso de estudo anterior. Em primeiro lugar, usando as janelas representadas nas Figuras 5.5 e 5.6, o utilizador define uma oferta com os participantes e respetivas centrais

presentes no MMR. Os dados das centrais dos participantes usados para obter os resultados apresentados na Tabela C.4 do Anexo C, encontram-se identificados nas Tabelas C.1 e C.2 presentes no Anexo C. As necessidades da rede encontram-se identificadas na Tabela C.3 do Anexo C, sendo iguais para os dois cenários.

Na Tabela 5.4 encontram-se presentes os resultados obtidos no caso de estudo, e ao comparar com os resultados obtidos sem a participação destes participantes “fixos”, Tabela C.4 do Anexo C, e os dados das necessidades do sistema, Tabela C.3 do Anexo C, foi possível chegar a mesma conclusão que o caso de estudo anterior, ou seja, a participação dos participantes “fixos” ajudou a baixar os preços praticados neste tipo de mercado, permitindo assim ao operador de rede obter uma maior poupança.



6 Módulo do Mercado de Futuros

O presente capítulo apresenta o módulo do mercado de futuros que foi desenvolvido no âmbito da presente dissertação, com o intuito de criar uma ferramenta que permita aos estudantes universitários efetuarem um estudo mais detalhado do funcionamento deste tipo de mercado. Será apresentada a interface gráfica do mesmo, bem como as diversas funcionalidades que este possui.

O módulo de mercado de futuros (MMF), é uma aplicação informática desenvolvida com o intuito de ser uma plataforma de aprendizagem para os estudantes universitários, tentando replicar a dinâmica do Mercado de Contratos de Futuros padronizados, assim como as regras estabelecidas pelo OMIP para a celebração deste tipo de contratos.

O MMF utiliza como linguagem de programação base o Java, sendo a plataforma *NetBeans IDE* utilizada para o seu desenvolvimento. De realçar, que o MMF utilizou o MATREM como base de apoio para o seu desenvolvimento, de forma a garantir o seu bom funcionamento e representação da dinâmica do mercado de contratos de futuros.

6.1 Interface gráfica

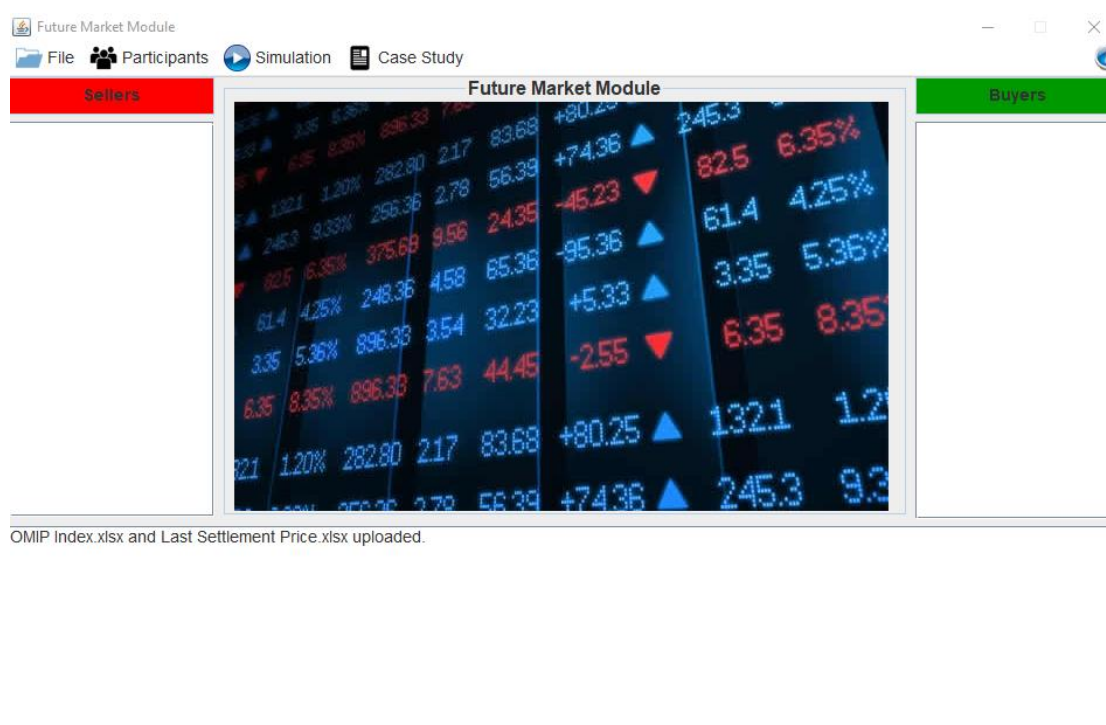


Figura 6.1 – Ilustração da interface gráfica do módulo de mercado de futuros

A interface gráfica do módulo encontra-se escrita em inglês, de modo a que a sua utilização possa ser feita nos diversos domínios académicos ou empresariais. As imagens apresentadas nesta secção representam casos meramente exemplificativos.

Toda a interface gráfica foi desenvolvida com o objetivo de ser o mais acessível e amigável (*user friendly*) para os utilizadores, de modo a facilitar a ambientação ao MMF.

Para uma adequada execução da simulação e obtenção de resultados, é necessário um procedimento executado de forma sequencial de forma a garantir que o MMF apresente um bom funcionamento.

Na Figura 6.1 encontra-se ilustrada a interface gráfica principal do MMF, na qual o utilizador encontra:

- Uma janela do lado direito a indicar os vendedores, *Sellers*;
- Uma janela do lado esquerdo a indicar os compradores, *Buyers*;
- Uma janela na parte inferior do módulo a descrever as ações do utilizador, como por exemplo: os participantes criados, carregados ou apagados, os participantes na sessão do mercado entre outras ações;
- Uma barra de opções localizada na parte superior que consiste em três menus (*File*, *Participants* e *Simulation*) e dois botões (*Case Study* e *About*).

De seguida, será apresentada uma descrição das diferentes funcionalidades presentes no módulo.

6.1.1 Menu Ficheiros (*File*)

Este menu permite salvaguardar os dados presentes no módulo em ficheiros *Excel* (*Save File*), carregar dados guardados em ficheiros (*Open File*), guardar ficheiros modelo dos preços do mercado diário e os preços dos contratos padronizados determinados pelo OMIP (*Save OMIP Index Template File* e *Save Last Settlement Price Template File*, respetivamente) e carregar os dados gravados em ficheiros relativos aos preços do mercado diário e os preços dos contratos padronizados estabelecidos pelo OMIP (*Open OMIP Index File* e *Save Last Settlement Price File*, respetivamente). Todas estas opções fazem uso da janela representada na Figura 4.2 para carregar/guardar dados.

Ao seleccionar *Open File*, o módulo efetua o carregamento dos dados guardados no ficheiro escolhido. De realçar, que o módulo se encontra dotado de mecanismos de proteção de entradas de dados, nomeadamente:

- Verificação dos caracteres, de forma a garantir que a informação relativa aos preços é apenas formada apenas por números (caso contrário, a informação em causa não será carregada);
- Verificação do nome do participante, de forma a garantir que cada participante tenha um nome exclusivo. Caso se verifique a existência de dois participantes com o mesmo nome, o módulo oferece ao utilizador a hipótese de renomear o participante em causa. Caso o utilizador não o queira efetuar, a informação relativa ao mesmo não será carregada;
- Verificação do nome das folhas do ficheiro, para que a que se encontre a ser consiga distinguir as diferentes informações e distribuir as mesmas nas mesmas categorias.

Para guardar os dados presentes no MMF num ficheiro, o utilizador seleciona *Save File*. Os dados salvaguardados consistem no nome dos participantes e nos dados relativos aos contratos celebrados anteriormente.

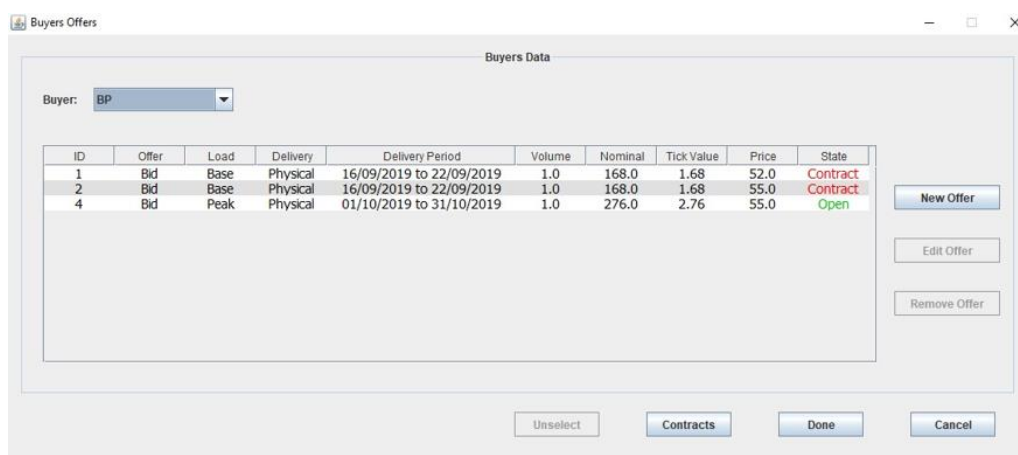
De realçar, que quando o módulo é iniciado, este carrega automaticamente dois ficheiros. O primeiro ficheiro, *SPOT Index.xlsx*, contem os preços do mercado diário, enquanto que o segundo ficheiro, *Last Settlement Price.xlsx*, contem os preços acordados diariamente pelo OMIP para este tipo de mercado. De referir, que o utilizador tem de atualizar estes ficheiros diariamente de forma a garantir o bom funcionamento do MMF.

Se algum destes ficheiros estiver em falta, ou que não seja possível efetuar o seu carregamento, o utilizador pode carregar manualmente através das opções *Open OMIP Index File* e *Save Last Settlement Price File*. Se for necessária uma nova versão dos ficheiros, o utilizador seleciona *Save OMIP Index Template File* ou *Save Last Settlement Price Template File* que guarda uma versão modelo do ficheiro, sendo que a informação necessária nos ficheiros tem de ser preenchida manualmente pelos utilizadores.

6.1.2 Menu Participantes (Participants)

Este menu é constituído por três opções: *New*, *Delete* e *Delete All*. A primeira opção, *New*, consiste na criação de novos participantes usando uma janela igual à que se encontra representada na Figura 4.3 (a). A segunda opção, *Delete*, oferece a hipótese de uma remoção parcial dos participantes, através de uma janela idêntica à que se encontra representada na Figura 4.5. A remoção de toda a informação é obtida através da opção *Delete All*.

6.1.3 Menu Simulação (Simulation)



The screenshot shows a window titled 'Buyers Offers' with a sub-header 'Buyers Data'. It features a dropdown menu for 'Buyer' set to 'BP'. Below this is a table with the following data:

ID	Offer	Load	Delivery	Delivery Period	Volume	Nominal	Tick Value	Price	State
1	Bid	Base	Physical	16/09/2019 to 22/09/2019	1.0	168.0	1.68	52.0	Contract
2	Bid	Base	Physical	16/09/2019 to 22/09/2019	1.0	168.0	1.68	55.0	Contract
4	Bid	Peak	Physical	01/10/2019 to 31/10/2019	1.0	276.0	2.76	55.0	Open

To the right of the table are three buttons: 'New Offer', 'Edit Offer', and 'Remove Offer'. At the bottom of the window are four buttons: 'Unselect', 'Contracts', 'Done', and 'Cancel'.

Figura 6.2 – Janela com as ofertas criadas pelos participantes

Este menu contém três opções: *Buyers* e *Sellers Offers* e *Future Market*. Ao selecionar as duas primeiras opções, o MMF abre a janela exposta na Figura 6.2. Através desta janela, o utilizador pode criar ofertas (*New Offer*), editar ofertas já existentes (*Edit Offer*), apagar ofertas (*Remove Offers*) e visualizar os contratos celebrados pelos diversos participantes (*Contracts*).

Através desta janela é possível visualizar alguns dos detalhes das ofertas criadas e que se encontram disponíveis, nomeadamente:

- *ID*: identificação numérica da proposta gerada automaticamente pelo módulo;
- *Offer*: descreve o tipo de oferta, ou seja, se é uma oferta de compra ou de venda;
- *Load*: qualifica o tipo de contrato pretendido, isto é, se a proposta é para um contrato do tipo *baseload* ou *peakload*;
- *Delivery*: qualifica o tipo de contrato bilateral, se é um contrato físico (*physical*) ou financeiro (*financial*);
- *Delivery Period*: período para o qual a proposta tem efeito;
- *Volume*: potência constante a ser fornecida/recebida durante o período de entrega, em MW;
- *Nominal*: energia entregue durante a duração do contrato pretendido, em MWh;
- *Tick Value*: valor do *Tick* da oferta, em Euros;
- *Price*: preço pretendido pela oferta criada;
- *State*: estado da oferta, se encontra aberta (*Open*) para celebrar um novo contrato, ou se já foi celebrado (*Contract*).

Através desta janela também é possível editar as ofertas submetidas anteriormente, sendo apenas possível alterar o preço e o volume das mesmas.

The image displays two side-by-side windows from the MMF software. The left window, titled 'New Offer - Future Contract', contains a form titled 'Future Contract Offer'. It has several sections: 'Offer Type' with radio buttons for 'Bid' (selected) and 'Ask'; 'Load Profile' with radio buttons for 'Baseload' and 'Peakload' (selected); 'Delivery type' with radio buttons for 'Physical' (selected) and 'Financial'; and 'Duration' with a dropdown menu set to 'Week'. At the bottom are 'Next' and 'Cancel' buttons. The right window, titled 'Offer Specifications', contains a form titled 'Future Contract Offer Specifications'. It has fields for 'Volume' (1 MW), 'Nominal' (60 MWh), 'Tick Value' (0.6 €), 'First Delivery Day' (23/09/2019), 'Last Delivery Day' (27/09/2019), 'Delivery Period' (23/09/2019 to 27/09/2019), 'Trading Period' (02/09/2019 to 20/09/2019), and 'Price' (53 €/MWh). At the bottom are 'Back', 'Cancel', and 'Submit' buttons.

(a) Criação da oferta

(b) Especificação da oferta

Figura 6.3 – Janelas para a criação de uma oferta

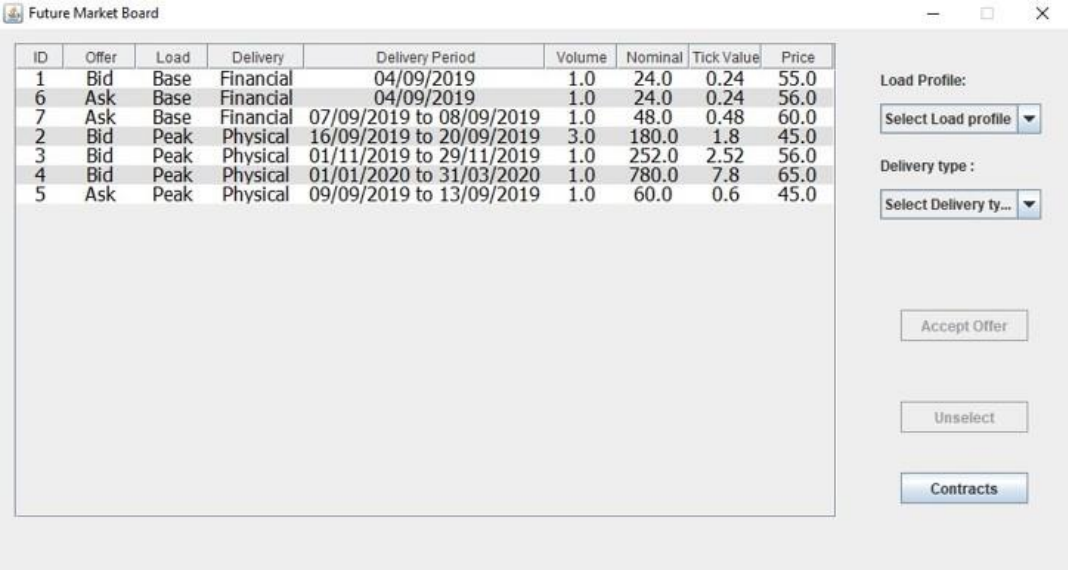
Através das janelas reproduzidas na Figura 6.3, são definidos os parâmetros de uma nova proposta de acordo com as necessidades e interesses do participante em questão.

Através da janela da Figura 6.3 (a) é definido o tipo de oferta (compra ou de venda), o perfil de carga (*baseload* ou *peakload*), o tipo de entrega (física ou financeira), e por último a duração, que varia consoante o perfil de carga e o tipo de entrega selecionado, de acordo com o que foi referido na secção 2.2.3.1.

Após o preenchimento dos parâmetros da Figura 6.3 (a) é aberta a janela representada na Figura 6.3 (b). Através desta janela são definidos: o primeiro dia de entrega e o preço (em €/MWh), sendo ainda possível ajustar o volume (em MW). Os restantes campos são preenchidos automaticamente, de acordo com a informação fornecida pela janela da Figura 6.3 (a) e as especificações dos contratos de futuros determinadas pelo OMIP.

De realçar, que quando é submetida uma nova oferta, esta é comparada pelo MMF com todas as ofertas ativas, de forma a determinar se alguma proposta existente corresponde a oferta criada, para que seja estabelecido um acordo automático entre os dois participantes. Para tal, as ofertas têm de ser submetidas por diferentes participantes, em que uma das ofertas têm de ser de compra, enquanto que a outra tem de venda, sendo os restantes parâmetros iguais.

Outra das características presentes no MMF, é que no final da sessão de negociação todas as ofertas deixam de estar disponíveis, garantindo assim que o MMF possui a mesma dinâmica do mercado regulado pelo OMIP.



ID	Offer	Load	Delivery	Delivery Period	Volume	Nominal	Tick Value	Price
1	Bid	Base	Financial	04/09/2019	1.0	24.0	0.24	55.0
6	Ask	Base	Financial	04/09/2019	1.0	24.0	0.24	56.0
7	Ask	Base	Financial	07/09/2019 to 08/09/2019	1.0	48.0	0.48	60.0
2	Bid	Peak	Physical	16/09/2019 to 20/09/2019	3.0	180.0	1.8	45.0
3	Bid	Peak	Physical	01/11/2019 to 29/11/2019	1.0	252.0	2.52	56.0
4	Bid	Peak	Physical	01/01/2020 to 31/03/2020	1.0	780.0	7.8	65.0
5	Ask	Peak	Physical	09/09/2019 to 13/09/2019	1.0	60.0	0.6	45.0

Load Profile:

Delivery type :

Figura 6.4 – Quadro do mercado de futuros, onde são exibidas todas as ofertas

Após a elaboração de todas as ofertas, o utilizador através da opção *Future Market* abre a janela apresentada na Figura 6.4. Nesta janela, encontram-se presentes todas as ofertas em aberto submetidas na presente sessão. As ofertas são apresentadas de forma

confidencial, garantindo uma maior transparência no processo de negociação, ao possibilitar que dois participantes celebrem um acordo sem ter o conhecimento da outra parte envolvida, garantindo assim que os interesses das duas partes são satisfeitos.

Nesta mesma janela, encontram-se as seguintes informações: ID da oferta, tipo de oferta, de carga e de entrega, o período de oferta, o volume, o nominal, o valor do *Tick* e o preço proposto pelo participante. De modo a facilitar a análise do quadro, é possível filtrar as ofertas submetidas de acordo com o perfil de carga e/ou tipo de liquidação.

Ao aceitar uma oferta, o participante que funciona como comprador tem de confirmar o vendedor, como é possível averiguar na janela ilustrada na Figura 6.5 (a).

Após a confirmação do acordo, é aberta uma nova janela que especifica o acordo alcançado, nomeadamente o vendedor e o comprador que até ao momento eram desconhecidos, assim como o valor aceite pelo comprador, como se pode verificar na janela presente na Figura 6.5 (b).

The figure consists of two side-by-side screenshots of software windows. The left window, titled 'Accept Offer', contains several input fields: 'Load Profile' (Base), 'Delivery Type' (Financial), 'Delivery Period' (04/09/2019), 'Volume' (1.0 MW), 'Nominal' (24.0 MWh), 'Tick Value' (0.24 €), 'Price' (55.0 €/MWh), and 'Participant Name' (a dropdown menu showing 'Endesa_Distribucion'). At the bottom are 'Cancel' and 'Accept' buttons. The right window, titled 'Future Contract #17', shows 'Future Contract Details'. It includes fields for 'ID' (17), 'Buyer Agent' (Galp_Energia), 'Seller Agent' (Endesa_Distribucion), 'Load Profile' (Base), 'Delivery' (Financial), 'Duration' (Day), 'Volume' (1.0 MW), 'Nominal' (24.0 MWh), 'Tick Value' (0.24 €), 'First Delivery Day' (04/09/2019), 'Last Delivery Day' (04/09/2019), 'Delivery Period' (04/09/2019), 'Trading Period' (30/08/2019 to 03/09/2019), and 'Price' (55.0 €/MWh). An 'OK' button is at the bottom.

(a) Seleção do participante vendedor

(b) Especificação do contrato

Figura 6.5 – Janelas com os detalhes de um contrato

Para além de ser possível consultar todas as ofertas disponíveis na janela representada na Figura 6.4, através da opção *Contracts* é possível aceder a todos os contratos celebrados através da janela representada na Figura 6.6, sendo que a mesma também pode apresentar os contratos celebrados por participante.

Como é possível verificar na Figura 6.6, para facilitar a consulta, a coluna referente ao estado do contrato apresenta uma cor diferente consoante o estado do mesmo (laranja, se o contrato se encontrar no período de negociação; verde, se o contrato se encontrar no período de entrega e vermelho se o contrato se encontrar finalizado) Também é possível

consultar algumas das características dos contratos, tais como, os participantes envolvidos, o período de entrega, o volume, nominal, o valor do *tick* e o preço acordado.

All Futures Contracts

ID	Buyer	Seller	Load	Delivery	Delivery Period	Volume	Nominal	Tick Value	Price	Contract State
1	Galp_Energia	Endesa_Distribucion	Base	Physical	27/04/2015 to 03/05/2015	1.0	168.0	1.68	45.0	Finished
2	BP	EDP	Base	Physical	01/01/2016 to 31/12/2016	1.0	8784.0	87.84	45.3	Finished
3	Galp_Energia	Endesa_Distribucion	Base	Physical	01/01/2016 to 31/12/2016	1.0	8784.0	87.84	45.65	Finished
4	Galp_Energia	Iberdrola	Base	Physical	01/01/2016 to 31/01/2016	1.0	744.0	7.44	48.0	Finished
5	Galp_Energia	EDP	Base	Physical	01/01/2016 to 31/03/2016	1.0	2183.0	21.83	49.05	Finished
6	Cepsa	Iberdrola	Base	Physical	01/03/2016 to 31/03/2016	1.0	743.0	7.43	43.65	Finished
7	Cepsa	Iberdrola	Base	Physical	01/04/2016 to 30/06/2016	1.0	2184.0	21.84	41.7	Finished
8	Cepsa	EDP	Base	Physical	01/06/2016 to 30/06/2016	1.0	720.0	7.2	41.22	Finished
9	BP	Endesa_Distribucion	Base	Physical	01/07/2016 to 31/07/2016	1.0	744.0	7.44	44.6	Finished
10	BP	Endesa_Distribucion	Base	Physical	01/07/2016 to 30/09/2016	1.0	2208.0	22.08	45.25	Finished
11	EDP	Endesa_Distribucion	Peak	Financial	14/05/2019	1.0	12.0	0.12	56.0	Finished
12	BP	Endesa_Distribucion	Peak	Financial	13/05/2019 to 17/05/2019	1.0	60.0	0.6	51.0	Finished
13	Endesa_Distribucion	Galp_Energia	Base	Physical	01/06/2019 to 30/06/2019	1.0	720.0	7.2	55.0	Finished
14	Cepsa	Galp_Energia	Base	Physical	03/06/2019 to 09/06/2019	1.0	168.0	1.68	55.0	Finished
15	Total	EDP	Peak	Physical	01/08/2019 to 30/08/2019	1.0	264.0	2.64	55.0	Finished
16	Iberdrola	EDP	Base	Physical	02/09/2019 to 08/09/2019	1.0	168.0	1.68	59.0	Delivery Period
17	EDP	Cepsa	Base	Financial	07/09/2019 to 08/09/2019	1.0	48.0	0.48	60.0	Trading Period
18	Galp_Energia	Endesa_Distribucion	Base	Financial	04/09/2019	1.0	24.0	0.24	55.0	Trading Period

Contract Data Results DSV Graphic Unselect Cancel

Figura 6.6 – Janela de exibição dos contratos celebrados

De referir, que o módulo oferece ao utilizador a hipótese de consultar os contratos celebrados pelos participantes, para além de poder editar o acordo alcançado. Visto que é possível renegociar este tipo de contrato até ao início do período de entrega, o MMF permite ao utilizador a possibilidade de renegociar um novo contrato dentro do período de negociação, de forma a poder trocar as posições dos dois participantes. Caso o utilizador queira trocar a posição dos participantes, este terá de criar uma nova oferta de natureza oposta aquela que o participante tem no contrato, ou seja, o vendedor terá de submeter uma oferta de compra e se for o comprador, este terá de submeter uma oferta de venda, com as mesmas especificações, podendo ter um preço diferente. No caso desta nova oferta resultar num novo acordo, os participantes em causa trocam de posição.

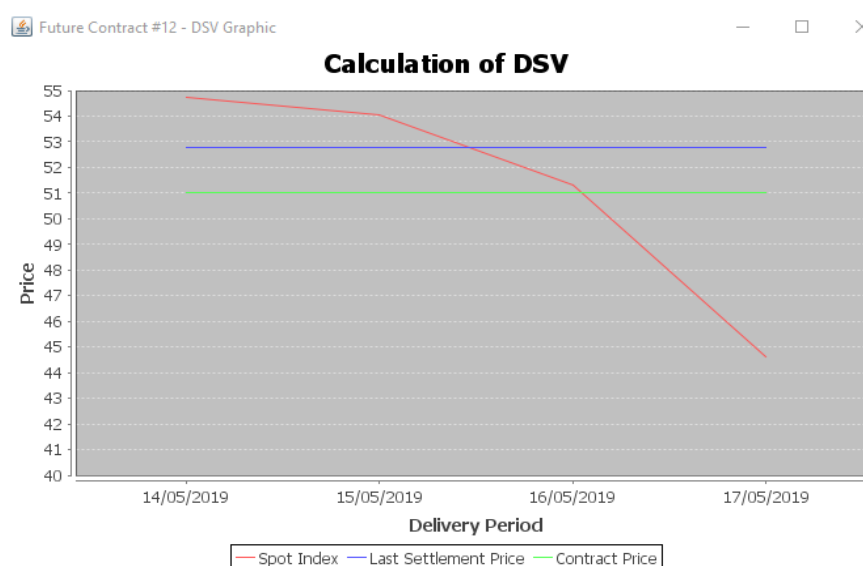


Figura 6.7 – Janela com o gráfico com os valores de referência

Caso o contrato se encontre na fase de entrega, ou mesmo terminado, é possível consultar em forma de gráfico os valores de referência do contrato, nomeadamente o preço de referência de negociação, os preços de referência *Spot* para o período de entrega, e o valor de liquidação na entrega (VLE), que resulta da comparação dos dois primeiros preços. Na janela representada na Figura 6.7, encontra-se presente um gráfico com os valores de referência de um contrato.

No término do período de entrega, o utilizador pode consultar os valores finais de pagamento entre os participantes, acedendo aos valores relativos a posição de cada um dos participantes no acordo estabelecido, nomeadamente o montante bruto, o valor de liquidação de entrega e o montante líquido. O montante bruto é calculado através do preço acordado entre os participantes e o valor nominal relativo ao mercado [19]. O VLE é calculado usando a Equação 2.2. O montante líquido, que representa o valor de compensação entre os participantes, é a soma do montante bruto com o VLE. Como se pode verificar na janela exposta na Figura 6.8, caso os valores apresentados sejam da cor verde o participante em causa foi compensado, caso contrário a contraparte foi compensada.

Quando os contratos possuem períodos de entrega superiores a um mês, o utilizador pode consultar os valores de compensação através de uma janela semelhante à que se encontra representada na Figura 6.8, apresentando os valores de liquidação para os meses que constituem o período de entrega. Apesar dos valores serem apresentados mensalmente, o utilizador pode também consultar os valores de liquidação para todos os dias do período de entrega.

The screenshot shows a software window titled "Future Contract Results". It contains a form with the following elements:

- Participant Name:** A text box containing "BP".
- Delivery Settlement Value:** A table with two rows of dates and values.

Date	Value
13/05/2019	33.28 €
14/05/2019	31.36 €
15/05/2019	20.16 €
16/05/2019	23.36 €
17/05/2019	131.04 €
- Total Values:** A section with three summary values:

Category	Value
Gross Amount	3060 €
DS Value	136.16 €
Net Amount	3196.16 €
- Buttons:** "DSV Graphic" and "OK".

Figura 6.8 – Janela com os valores de compensação entre os participantes

6.1.4 Botão Caso de Estudo (Case Study)

O caso de estudo apresentado no MMF, desenvolvido na dissertação de mestrado “*Mercados Liberalizados de Energia Elétrica: Contratos Padronizados de Futuros*” [19],

consiste na comparação entre os ganhos que cada participante pode obter no mercado de contratos padronizados de futuros. Como tal, foram celebrados 22 contratos, cujo objetivo é estabelecer uma comparação entre os ganhos obtidos pelos dois constituintes do contrato. Estes contratos apresentam diferentes durações, mas têm o mesmo tipo de liquidação (física) e de entrega (*baseload*).

O utilizador ao carregar no botão *Case Study*, o MMF abre uma janela idêntica à que se encontra na Figura 4.8, na qual é feita uma breve descrição do caso de estudo. De seguida, é uma janela idêntica à que se encontra representada na Figura 6.6, na qual se encontram identificados os 22 contratos, sendo ainda possível consultar os resultados obtidos por contrato numa janela idêntica à que se encontra ilustrada na Figura 6.7.

Na Tabela 6.1, encontram-se identificados alguns dos dados relativos aos 22 contratos e respetivos detalhes (primeiro e último dia de entrega; preço em €/MWh; VLE e os ganhos em €).

Tabela 6.1 – Ganhos dos contratos de futuros

ID	Primeiro Dia	Último Dia	Preço (€/MWh)	VLE (€)	Ganhos (€)
01	27/04/2015	03/05/2015	45,00	-291,84	7 268,16
02	01/01/2016	31/12/2016	45,30	64 132,08	462 047,28
03	01/01/2016	31/12/2016	45,65	64 132,08	465 121,68
04	01/01/2016	31/01/2016	48,00	7 483,44	43 195,44
05	01/01/2016	31/03/2016	49,05	36 444,48	143 520,40
06	01/03/2016	31/03/2016	43,65	-58,32	32 258,19
07	01/04/2016	30/06/2016	41,70	17 889,60	108 962,40
08	01/06/2016	30/06/2016	41,22	2 060,64	31 739,04
09	01/07/2016	31/07/2016	44,60	2 148,00	35 330,40
10	01/07/2016	30/09/2016	45,25	5 491,68	105 403,68
11	05/09/2016	11/09/2016	44,25	-320,88	7 113,12
12	19/09/2016	25/09/2016	42,08	-88,80	6 980,64
13	09/01/2017	15/01/2017	60,00	-1 302,48	8 777,52
14	16/01/2017	22/01/2017	77,00	-460,56	12 475,44
15	23/01/2017	29/01/2017	68,00	-781,92	10 642,08
16	30/01/2017	05/02/2017	61,00	90,48	10 338,48
17	01/01/2017	31/01/2017	40,30	-8 494,08	78 513,62
18	01/02/2017	28/02/2017	53,85	3 879,84	40 067,04
19	01/03/2017	31/03/2017	49,88	-254,40	36 856,32
20	01/04/2017	30/04/2017	39,50	-1 734,48	26 705,52
21	01/04/2017	30/06/2017	37,30	-4 550,64	76 912,56
22	01/07/2017	30/09/2017	43,88	5 095,68	101 982,72

A partir dos dados obtidos do MMF, é possível verificar que o vendedor conseguiu uma posição mais vantajosa em 11 dos 22 contratos. Esta conclusão, permite afirmar os ganhos que os participantes podem obter neste tipo de mercado dependem do preço que os participantes têm estabelecido no contrato. Tendo em conta, que os ganhos que cada participante pode obter se encontram sujeitos as oscilações dos preços do mercado diário, existe sempre um dos participantes a ser mais beneficiado com o contrato estabelecido, o que leva a que este mercado possa ser encarado como uma alternativa credível ao mercado diário por parte dos participantes.



7 Módulo do Mercado Bilateral

O presente capítulo apresenta o módulo do mercado bilateral que foi desenvolvido no âmbito da presente dissertação, com o intuito de criar uma ferramenta que permita aos estudantes universitários efetuarem um estudo mais detalhado do funcionamento deste tipo de mercado de energia. Será apresentada a sua interface gráfica, bem como as diversas funcionalidades que este possui.

O módulo do mercado bilateral (MMB), é uma aplicação informática desenvolvida com o intuito de ser uma plataforma de aprendizagem para os estudantes universitários, tentando replicar o tipo de negociação desenvolvida no mercado bilateral, no qual os contratos são estabelecidos de forma direta entre dois agentes, e que apenas é comunicado ao operador de sistema o contrato estabelecido.

A linguagem de programação escolhida foi o Java, sendo usada a plataforma *Net-Beans IDE* para o seu desenvolvimento. Foi usada a plataforma multi-agente JADE como *software base* do MMB, pois através das suas características e protocolos é possível replicar os comportamentos e capacidade de comunicação dos agentes envolvidos na negociação.

De destacar, que o MATREM funciona como base de apoio para o desenvolvimento do MMB, de forma a garantir o funcionamento e representação da dinâmica do mercado de contratos bilaterais.

7.1 Interface gráfica

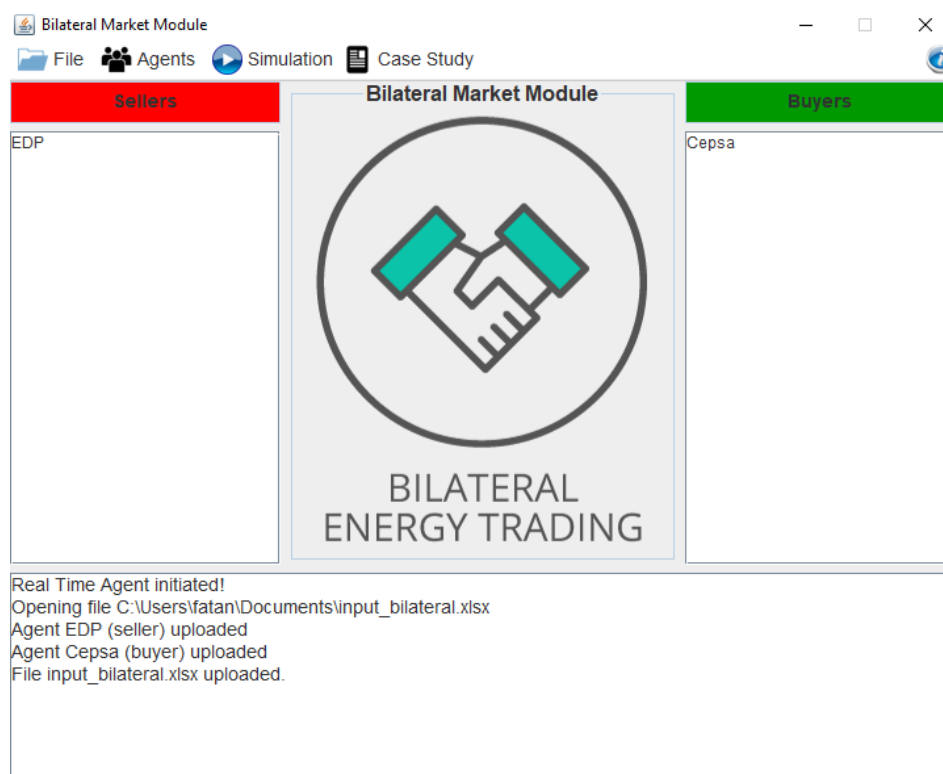


Figura 7.1 – Ilustração da interface gráfica do módulo de mercado bilateral

A interface gráfica do módulo encontra-se escrita em inglês, de modo a que a sua utilização possa ser feita nos diversos domínios académicos ou empresariais. As imagens apresentadas nesta secção representam casos meramente exemplificativos.

Toda a interface gráfica foi desenvolvida com a finalidade de ser o mais acessível e amigável (*user friendly*) para todos os utilizadores, de forma a proporcionar uma fácil ambientação à ferramenta.

Para uma adequada execução da simulação e obtenção de resultados, é necessário um procedimento executado de forma sequencial, a fim de configurar as diversas variáveis necessárias para o correto funcionamento do MMB.

A Figura 7.1 encontra-se ilustrada a interface gráfica principal do MMB, na qual o utilizador encontra:

- Uma janela do lado direito a indicar os vendedores, *Sellers*;
- Uma janela do lado esquerdo a indicar os compradores, *Buyers*;
- Uma janela na parte inferior do módulo a descrever as ações do utilizador, como por exemplo: os agentes criados, carregados ou apagados, os agentes que participam na negociação, entre outras ações;
- Uma barra de opções localizada na parte superior que consiste em três menus (*File*, *Participants* e *Simulation*) e dois botões (*Case Study* e *About*).

De seguida, será apresentada uma descrição dos diferentes menus e botões presentes no módulo.

7.1.1 Menu Ficheiros (*File*)

Este menu permite carregar dados relativos a simulações antigas (*Open File*) ou gravar novos dados em ficheiros *Excel* (*Save File*), através de uma janela idêntica a que se encontra representada na Figura 4.2.

Através da opção *Open File*, o MMB carrega os dados guardados no ficheiro escolhido pelo utilizador. De realçar, que o módulo se encontra dotado de mecanismos de proteção de entrada de dados, nomeadamente:

- Verificação dos caracteres, de forma a garantir que a informação relativa aos preços e volumes de energia de cada agente apenas contem números e 24 entradas (caso contrário a informação do agente em causa não será carregada);
- Verificação do nome do participante, de forma a garantir que cada participante tenha um nome exclusivo. Caso se verifique a existência de dois participantes com o mesmo nome, o módulo oferece ao utilizador a hipótese de renomear o participante em causa. Caso o utilizador não o queira efetuar, a informação relativa ao mesmo não será carregada;
- Verificação do nome das folhas do ficheiro, para que a que se consiga distinguir as diferentes informações e distribuir as mesmas nas respetivas categorias.

Ao selecionar *Save File*, serão guardados os dados presentes no módulo num ficheiro *Excel*. Os dados guardados consistem no nome dos participantes, assim como os preços e volumes de energia disponíveis no momento da negociação e os detalhes dos contratos celebrados entre os agentes.

7.1.2 Menu Agentes (*Agents*)

Este menu permite ao utilizador: criar (*New*); editar (*Edit*); apagar agentes (*Delete*), ou remover todos os dados presentes no módulo (*Delete All*).

Para criar agentes (*New*), são usadas janelas idênticas às que se encontram expostas na Figura 4.3. Através da janela representada na Figura 4.3 (a) é definido o nome do agente e o seu objetivo (vendedor ou comprador). Através da janela ilustrada na Figura 4.3 (b) são definidos os preços máximos e mínimos (em €/MWh), assim como a energia máxima e mínima (em kWh) que o agente apresentará no momento da negociação.

A opção *Edit* permite selecionar um agente para editar os preços e os volumes de energia com que irá participar no mercado. O agente a editar é escolhido através de uma janela idêntica à que se encontra representada na Figura 4.4. Após a seleção do agente, o módulo abre uma janela idêntica a que se encontra representada na Figura 4.3 (b) para proceder aos ajustes necessários.

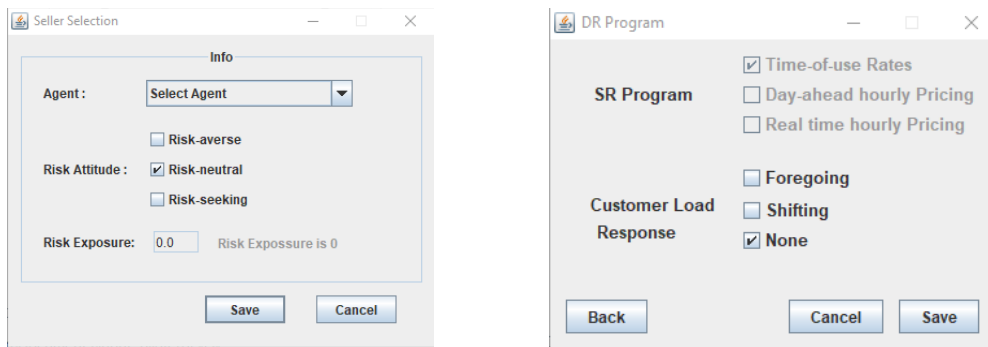
Através da opção *Delete* o MMB aberta uma janela idêntica à que se encontra exposta na Figura 4.5 e o utilizador seleciona o(s) agente(s) que deseja eliminar.

7.1.3 Menu Simulação (*Simulation*)

Neste menu encontram-se expostas quatro opções: *Seller*, *Buyer*, *Simulation* e *Contracts*. Ao selecionar as duas primeiras opções, o MMB abre a janela ilustrada na Figura 7.2 (a), na qual o utilizador seleciona os agentes que vão participar na negociação. É também através desta janela que é definida a atitude de risco que cada agente apresenta no momento da negociação. A atitude de risco pode ser:

- *Risk-averse*, o agente é adverso ao risco, sendo que a sua exposição é um valor situado entre 0 e 1;
- *Risk-neutral*, o agente não apresenta qualquer exposição ao risco;
- *Risk-seeking*, o agente é propício ao risco, sendo que a sua exposição apresenta um valor entre -1 e 0.

Após a seleção do agente comprador, o utilizador também tem de definir se o contrato a negociar apresenta um programa de gestão da procura, através da janela representada na Figura 7.2 (b).



(a) Seleção do agente e respetivo risco (b) Definição do programa de gestão da procura

Figura 7.2 – Janelas de definição dos parâmetros dos agentes

Após a seleção dos agentes que vão participar na negociação, o utilizador seleciona a opção *Simulation*. É através desta opção que são definidos os restantes parâmetros necessários para a negociação. O primeiro parâmetro a ser definido é o horário para o qual o contrato vai se encontrar em vigor. Este parâmetro é definido pela janela ilustrada na Figura 7.3.

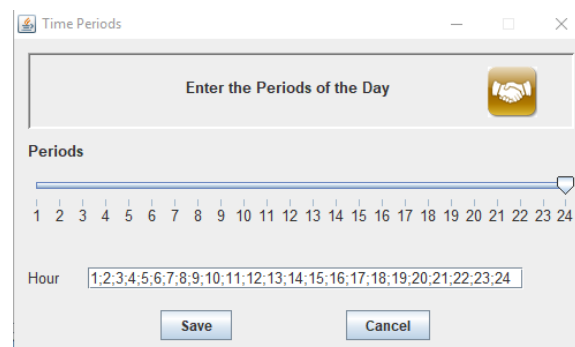


Figura 7.3 – Janela de definição do horário de entrega de energia

De seguida, através da janela reproduzida na Figura 7.4, é estabelecido o limite temporal que cada agente tem para concluir a negociação, independentemente se os agentes conseguiram alcançar um acordo ou não. Através da janela ilustrada na Figura 7.5, é definido a duração do contrato e a data limite que os dois agentes têm para alcançar um acordo.

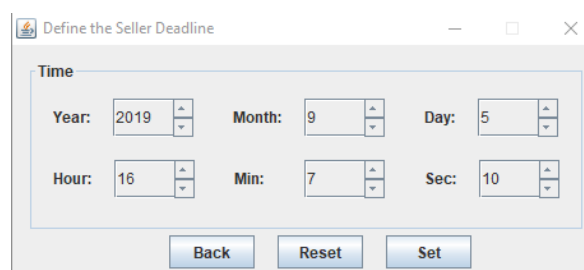
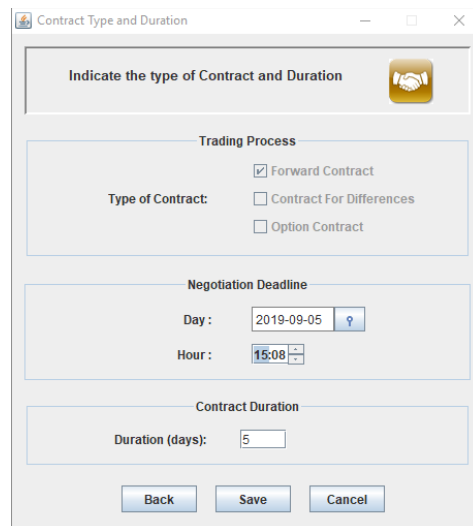


Figura 7.4 – Janela de definição da data limite de cada agente



Contract Type and Duration

Indicate the type of Contract and Duration

Trading Process

Type of Contract:

- ☒ Forward Contract
- ☐ Contract For Differences
- ☐ Option Contract

Negotiation Deadline

Day: 2019-09-05

Hour: 15:08

Contract Duration

Duration (days): 5

Back Save Cancel

Figura 7.5 – Janela de definição do tipo de contrato e duração do mesmo

Após a definição de todos os parâmetros, o módulo abre as interfaces representadas nas Figuras 7.6 e 7.7. É através dos protocolos de comunicação presentes no JADE, que os agentes são capazes de estabelecer as comunicações entre ambos, sendo essencial para o desenvolvimento do processo negocial.

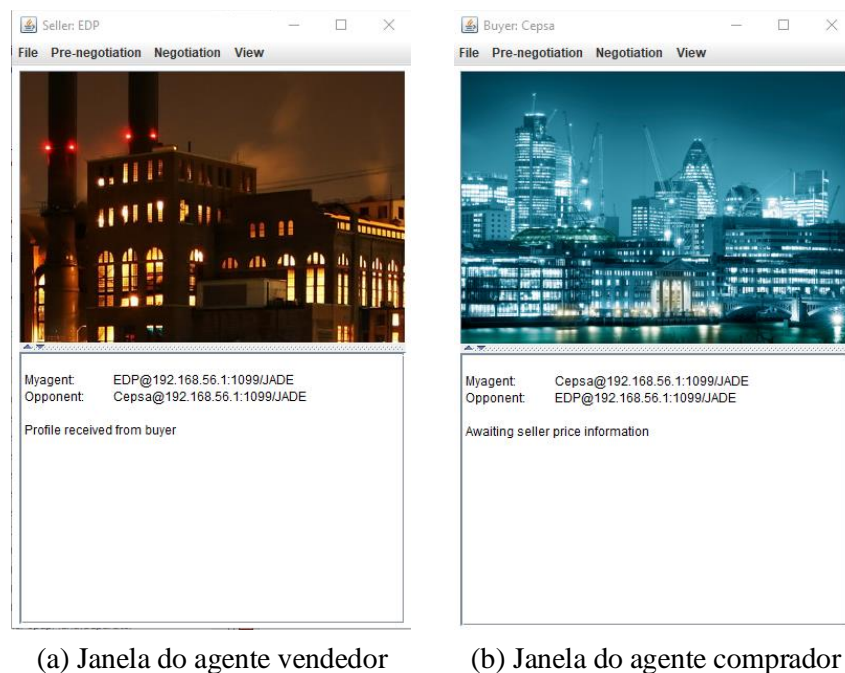



Figura 7.6 – Janelas de negociação dos agentes

É através dos menus presentes na parte superior das duas interfaces, que é possível: efetuar a negociação; aceder a gráficos que descrevem a evolução financeira das propostas e possíveis ganhos e ainda gravar num ficheiro de texto a informação presente na janela localizada no lado inferior da interface.

Buyer: Cepsa

Indicate your Typical Electricity Consumption Pattern 

Industrial

Period	Energy (kWh)	Period	Energy (kWh)
Period 1:	235.05	Period 13:	348.41
Period 2:	223.97	Period 14:	353.68
Period 3:	218.31	Period 15:	349.25
Period 4:	217.86	Period 16:	343.70
Period 5:	224.72	Period 17:	325.17
Period 6:	249.29	Period 18:	311.61
Period 7:	300.43	Period 19:	305.24
Period 8:	323.08	Period 20:	298.48
Period 9:	339.34	Period 21:	290.46
Period 10:	345.04	Period 22:	282.06
Period 11:	347.98	Period 23:	265.42
Period 12:	345.83	Period 24:	249.54

Send Cancel

Figura 7.7 – Janela definição do perfil de carga do agente comprador

Através da janela representada na Figura 7.7 o utilizador define o perfil de carga do agente comprador. O MMB tem disponíveis três perfis de carga pré-definidos (*Commercial*, *Industrial* e *Residential*) para além do perfil de carga definido aquando da criação ou edição do agente comprador.

Após a seleção do perfil de carga, o MMB envia a informação para o agente vendedor, passando a ser possível estabelecer os restantes limites financeiros e energéticos necessários para dar início ao processo de negociação.

Para cada agente, o utilizador tem de definir:

- A importância dos períodos, ou seja, quais as horas em que o agente não se encontra disposto a ceder nos preços e volumes de energia e vice-versa;
- Os preços mínimos que o vendedor aceita vender e os preços máximos que o comprador aceita pagar;
- Os volumes de energia mínimos e máximos que o comprador aceita receber;
- A forma como o agente organiza as ofertas que recebe;
- O tipo de estratégia que o agente vai utilizar para determinar os preços das propostas que envia a contraparte.


De realçar, que para estabelecer a estratégia e a forma como os agentes organizam as ofertas são utilizadas duas janelas idênticas à que se encontra representada na Figura 7.8. As restantes condições são definidas através de janelas idênticas à que se encontra exposta na Figura 7.7.

Figura 7.8 – Janela de definição da estratégia a usar na negociação

O utilizador dispõe de 11 estratégias distintas para cada agente, para as quais o MMB tem definido um algoritmo que calcula os preços e volumes de energia de cada proposta enviada ao adversário, tendo em conta os parâmetros definidos anteriormente.

Após a definição de todas as condições da negociação, é iniciado o processo negocial. Em primeiro lugar, o vendedor envia ao comprador uma proposta capaz de cobrir as necessidades energéticas do comprador.

Buyer: Cepsa



Strategy: Low-Priority Concession

Received EDP Proposal 1

Received:		To Send:	
Cost (k€):	1.746	1.423	
		€/MWh	€/MWh
Period 1:	51.18	42.26	Period 13: 55.64 45.56
Period 2:	40.45	32.85	Period 14: 55.57 45.51
Period 3:	39.61	31.49	Period 15: 51.56 42.54
Period 4:	39.55	31.45	Period 16: 50.35 41.65
Period 5:	39.15	31.15	Period 17: 42.43 34.31
Period 6:	39.55	31.45	Period 18: 40.93 32.47
Period 7:	46.90	38.36	Period 19: 38.06 31.08
Period 8:	55.57	45.51	Period 20: 42.00 34.00
Period 9:	53.88	43.52	Period 21: 51.18 42.26
Period 10:	55.57	45.51	Period 22: 55.18 45.22
Period 11:	58.18	47.44	Period 23: 55.30 45.31
Period 12:	55.57	45.51	Period 24: 52.21 43.03

Accept

Send

New

Withdraw

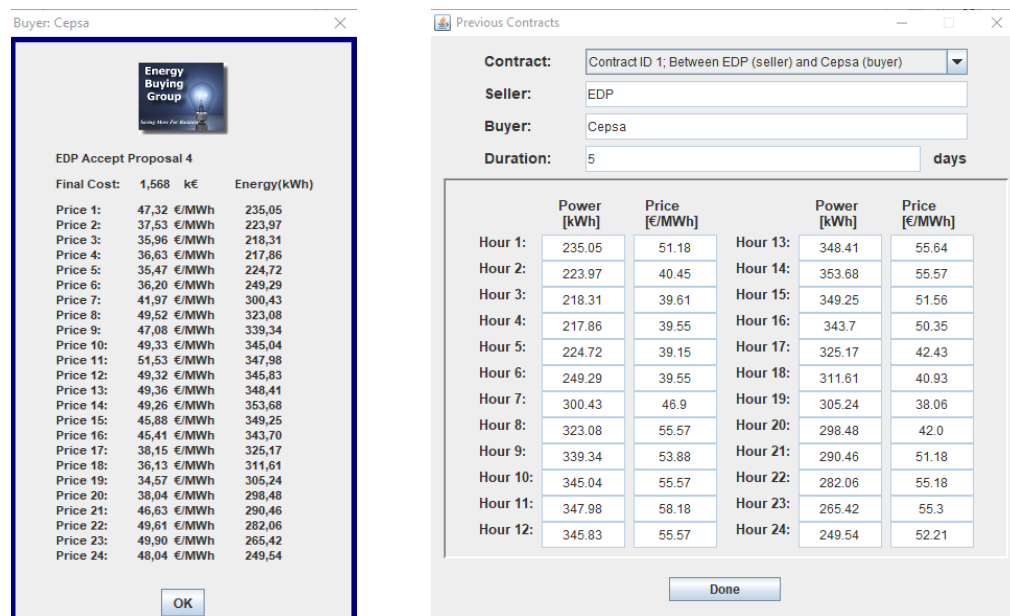
Figura 7.9 – Janela de definição de contraofertas

Após receber a proposta inicial e usando uma janela idêntica à que se encontra ilustrada na Figura 7.9, o utilizador na pele do comprador pode consultar a mesma e pode

decidir: aceitar (*Accept*), fazer uma contraoferta com base nos valores gerados pelo algoritmo definido anteriormente pelo MMB (*Send*), criar uma nova contraproposta (*New*) ou desistir do processo de negociação (*Withdraw*).

Os valores da contraoferta encontram-se presentes na janela representada na Figura 7.9. Se o utilizador decidir continuar com a negociação, este irá enviar a contraoferta definida pelo MMB, ou uma contraoferta definida manualmente pelo utilizador, que terá sempre em conta os limites estabelecidos anteriormente. Este processo é repetido até que uma das partes aceite uma oferta ou que desista da negociação.

De destacar, que quando o algoritmo calcular uma oferta pior que a proposta recebida, este vai aconselhar o utilizador a aceitar a proposta recebida. Se os dois participantes chegarem a um acordo, é aberta a janela representada na Figura 7.10 (a), na qual são encontrados os detalhes do contrato, nomeadamente os preços e os volumes de energia acordados entre os agentes.



(a) Celebração de um contrato (b) Dados de um contrato celebrado anteriormente

Figura 7.10 – Janelas com os dados de um contrato

A opção *Contracts*, permite ao utilizador consultar os detalhes dos contratos celebrados anteriormente pelos agentes através da janela representada na Figura 7.10 (b).

7.1.4 Botão Caso de Estudo (Case Study)

Ao seleccionar o botão *Case Study*, o MMB apresenta o caso de estudo desenvolvido na dissertação “Negociação de um novo Contrato para a Biblioteca da FCT através de Gestão Dinâmica de Preço e Quantidade de Energia” [53]. Este caso de estudo consiste

na elaboração de um contrato bilateral entre a biblioteca da FCT e o fornecedor de energia, no qual são definidas as tarifas para os períodos de ponta, de cheias, vazio e super-vazio.

Após selecionar o botão *Case Study* são abertas duas janelas idênticas às que se encontram representadas na Figura 4.8, nas quais é feita uma breve descrição do caso de estudo.

Tabela 7.1 – Dados dos limites de preços e volumes da biblioteca da FCT

Tarifa	Preços Máximos (€/MWh)	Volumes Máximos (kWh)	Volumes Mínimos (kWh)
Ponta	62,38	319,33	292,55
Cheia	58,63	906,42	828,91
Vazio	52,34	77,04	32,74
Super-Vazio	46,26	4,48	4,48

A biblioteca da FCT apresenta algumas particularidades, que foram tidas em conta no momento da definição dos preços máximos que aceita pagar, para além dos volumes máximos e mínimos necessários para garantir o bom funcionamento da mesma [53]. Os dados relativos aos limites dos preços e volumes encontram-se disponíveis na Tabela 7.1. Os preços mínimos que o fornecedor de energia, aceita receber encontram-se descritos na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 – Dados dos limites de preços do fornecedor de energia

Tarifa	Preços Mínimos (€/MWh)
Ponta	59,05
Cheia	55,05
Vazio	49,55
Super-Vazio	43,79

Para o processo de negociação foi definido que a biblioteca vai utilizar uma estratégia baseada no volume de energia, sendo que o fornecedor de energia vai utilizar uma estratégia de concessão adaptada à variação de volume.

Após o processo negocial, representado na Tabela D.1 do Anexo D, foi possível obter as tarifas e os respetivos volumes, que se encontram identificados na Tabela 7.3. Após estabelecer uma comparação com a tarifa atual, é possível verificar que houve uma ligeira redução nos preços simulados.

Tabela 7.3 – Comparação das tarifas atuais e obtidas no MMB

Tarifa	Atual (€/MWh)	Simulada (€/MWh)	Volumes simulados (kWh)
Ponta	60,57	60,34	292,55
Cheia	56,93	56,71	828,91
Vazio	50,82	50,62	32,74
Super-Vazio	44,92	44,75	4,48

Tabela 7.4 – Comparação dos custos atuais com os custos obtidas no MMB

Tarifa	Custos atuais (€)	Custos simulados (€)	Diferença (€)
Ponta	19,34	17,65	1,69
Cheia	51,60	47,01	4,60
Vazio	3,92	1,66	2,26
Super-Vazio	0,20	0,20	0,00
Total	75,06	66,52	8,54

Usando os preços e volumes de energia atuais e os preços e volumes de energia obtidos após a simulação é possível efetuar o cálculo dos custos. Os resultados apresentados na Tabela 7.4 demonstram que o contrato obtido no MMB consegue diminuir os custos em 8,54€.



8 Conclusões e Trabalho Futuro

Este capítulo apresenta as principais conclusões extraídas de todo o trabalho realizado no âmbito da presente dissertação, bem como descreve algumas considerações a ter em conta em possíveis trabalhos futuros com o objetivo de aperfeiçoar os diversos módulos.

8.1 *Síntese de Resultados*

O processo de liberalização do sector elétrico potenciou a sua reestruturação e desencadeou um período em que os mercados de energia elétrica desenvolveram e cresceram. O fim dos monopólios no sector e a abertura destes mercados à concorrência levou a um grande aumento de entidades participantes, que contribuiu para o aumento dos níveis de competitividade, bem como a melhoria da eficiência dos ramos da produção e comercialização de energia.

Tendo como exemplo o sector elétrico nacional, a sua liberalização contribuiu para um aumento da competitividade através da adoção de um modelo vertical do mercado, garantido assim uma maior transparência de preços e melhores benefícios para os consumidores. Foi neste contexto que os Governos de Portugal e Espanha uniram esforços e criaram um mercado comum, o Mercado Ibérico de Eletricidade (MIBEL).

Através do MIBEL, é possível comercializar energia em dois tipos de mercados liberalizados, o mercado em bolsa e o mercado a prazo. O mercado em bolsa envolve os mercados diário e intradiário. O mercado diário assenta a sua estrutura no modelo de oferta-procura, ou seja, entre a produção e a procura de energia elétrica. O mercado intradiário funciona como complemento ao mercado diário, no sentido de que eventuais desvios na procura possam ser corrigidos. Através do mercado a prazo, os participantes estabelecem contratos entre si, sendo que neste mercado os utilizadores se encontram mais protegidos da volatilidade dos preços praticados no mercado diário. Para além destes mercados, ainda existe o mercado de reservas, que tem como finalidade a compra de energia elétrica necessária para a correção de desvios de frequência e de potências que existam na rede. Este mercado é regulado pelo operador de rede, a REN.

O aumento dos níveis de competitividade, assente no maior número de participantes no mercado originou, de forma natural, uma maior complexidade do sistema elétrico. Esta complexidade desencadeou novos desafios aos participantes, sobretudo na previsão de preços e estabilização dos mesmos. É a partir deste contexto que surge a necessidade de desenvolver ferramentas computacionais capazes de oferecerem aos seus utilizadores a capacidade de replicar o funcionamento dos mercados. Os sistemas multi-agente através das suas características de autonomia, de reatividade, de pro-atividade e capacidade social, revelaram ser uma escolha benéfica para o estudo dos mercados de energia elétrica, sendo assim possível replicar, com maior fidelidade, os comportamentos e estratégias dos diferentes participantes do mercado.

Os mercados de energia são hoje uma realidade na maioria dos países Europeus e Mundiais (salienta-se o MIBEL, o mercado do Norte da Europa, designado *NordPool*, e vários mercados Americanos, como o *NYISO*, referente a Nova Iorque, e o *CAISO*, para a Califórnia). Neste contexto, é expectável que a maioria das Universidades tenha pelo

menos uma disciplina destinada à análise e compreensão dos mercados de energia elétrica. O principal objetivo da presente dissertação consiste no desenvolvimento de quatro módulos capazes de demonstrarem aos estudantes de Engenharia Eletrotécnica, bem como de outras Engenharias, e de Gestão, o funcionamento e dinâmica presente nos diferentes tipos de mercados.

De forma a implementar uma ferramenta computacional que apresentasse um maior grau de semelhança com os diferentes tipos de mercados, a mesma foi analisada e comparada com alguns simuladores já existentes, destacando-se os simuladores EMCAS, MASCEM e MATREM.

Por conseguinte, recorrendo à linguagem de programação Java, foram desenvolvidos quatro módulos, nomeadamente os módulos de mercado diário, a prazo, bilateral e de reservas, bem como as respetivas interfaces gráficas. Salienta-se que o módulo de mercado bilateral faz uso da tecnologia multi-agente e do JADE, por forma a que seja possível replicar os comportamentos dos agentes no momento da negociação.

Por último, realça-se que todos os módulos se encontram dotados de casos de estudos, em que o objetivo é apresentar aos estudantes exemplos simples do funcionamento dos diversos mercados e do módulo.

8.2 *Trabalho Futuro*

Em termos de trabalho futuro, com o intuito de aperfeiçoar os módulos apresentados na presente dissertação, algumas linhas de desenvolvimento podem ser seguidas, de forma a que os módulos apresentem maior realismo e robustez. Algumas das linhas de desenvolvimento a seguir são:

- Integração do mercado intradiário no módulo de mercado diário, de forma a funcionar como complemento ao mercado diário e assim formar um simulador de mercado em bolsa;
- Integrar nos módulos de mercado diário e de reservas uma ferramenta capaz de realizar previsões de consumo fazendo uso de dados meteorológicos, uma vez que o consumo de energia depende em grande parte das condições meteorológicas, permitindo assim auxiliar os utilizadores na tarefa de criar as ofertas de compra e venda de energia;
- Dotar o módulo de mercado de futuros de uma ferramenta que permita obter os valores dos contratos de futuros definidos pelo OMIP automaticamente;
- Implementação de SMA's nos módulos de mercado diário, de reservas e de futuros de forma a garantir que os diversos agentes apresentem novas propostas e comportamentos que tenham como base os resultados obtidos em sessões de negociação anteriores e nos comportamentos e propostas apresentadas pelos restantes agentes;

- Dotar o módulo de mercado bilateral de novos modelos de negociação, nomeadamente contratos por diferenças e contratos de opções e introdução de novos programas de gestão da procura;
- Munir os agentes do módulo de mercado bilateral de novas capacidades de análise e de aprendizagem, de forma a poderem moldar a sua estratégia de participação de acordo com os seus interesses, necessidades e resultados obtidos anteriormente.

Referências

- [1] J. P. T. Saraiva, M. T. C. P. da Silva, e M. T. P. de Leão, *Mercados de Electricidade - Regulação e Tarificação de Uso das Redes*, 1ª Edição. FEUP Edições, 2002.
- [2] ERSE, (2019, julho). *Funcionamento do Setor Elétrico*. [Online]. Disponível em: <http://www.erse.pt/pt/electricidade/actividadesdosector/Paginas/default.aspx>.
- [3] F. Lopes e H. Coelho, *Electricity Markets with Increasing Levels of Renewable Generation: Structure, Operation, Agent-based Simulation, and Emerging Designs*, 1ª Edição. Springer International Publishing AG, 2018.
- [4] E. Oliveira, K. Fischer, e O. Stepankova, “Multi-agent systems: Which research for which applications”, *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 27, n. 1, pp. 91–106, 1999.
- [5] F. Lopes e H. Coelho, “Electricity Markets and Intelligent Agents Part II: Agent Architectures and Capabilities”, em *Electricity Markets with Increasing Levels of Renewable Generation: Structure, Operation, Agent-based Simulation, and Emerging Designs*. Springer International Publishing AG, 2018, pp. 49–77.
- [6] F. Lopes, “MATREM: An Agent-Based Simulation Tool for Electricity Markets”, em *Electricity Markets with Increasing Levels of Renewable Generation: Structure, Operation, Agent-based Simulation, and Emerging Designs*. Springer International Publishing AG, 2018, pp. 189–225.
- [7] D. Vidigal, F. Lopes, A. Pronto, e J. Santana, “Agent-Based Simulation of Wholesale Energy Markets: A Case Study on Renewable Generation”, *26th International Workshop on Database and Expert Systems Applications (DEXA)*, pp. 81–85, 2016.
- [8] H. Algarvio, A. Couto, F. Lopes, e A. Estanqueiro, “Changing the Day-Ahead Gate Closure to Wind Power Integration: A Simulation-Based Study”, *Energies* 2019, vol. 12, n. 14, p. 2765.

- [9] F. Lopes, N. Mamede, A. Q. Novais, e H. Coelho, “A negotiation model for autonomous computational agents: Formal description and empirical evaluation”, *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, vol. 12, pp. 195–212, 2002.
- [10] F. Lopes, N. Mamede, A. Q. Novais, e H. Coelho, “Negotiation tactics for autonomous agents”, em *Proceedings of the 12th International Workshop on Database and Expert Systems Applications (DEXA)*, 2001, pp. 1–5.
- [11] F. Lopes, H. Algarvio, e H. Coelho, “Bilateral contracting in multi-agent electricity markets: Negotiation strategies and a case study”, em *International Conference on the European Energy Market (EEM-13)*, 2013, pp. 1–8.
- [12] H. Algarvio, F. Lopes, A. Couto, e A. Estanqueiro, “Participation of wind power producers in day-ahead and balancing markets: An overview and a simulation-based study”, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, vol. 8, pp. 1–13, 2019.
- [13] M. Shahidehpour, H. Yamin, e Z. Li, *Market Operations in Electric Power Systems : Forecasting, Scheduling, and Risk Management*, vol. 9. John Wiley & Sons Publications, 2002.
- [14] J. Gonçalves, “Modelos para a Comercialização de Energia Elétrica em Ambiente de Mercado”, Tese de Mestrado, Instituto Politécnico de Coimbra, 2013.
- [15] C. Ilco, “Negociação Bilateral em Mercados de Energia Elétrica Multi-Agente com Participação Activa dos Consumidores”, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2012.
- [16] F. Azevedo, “Gestão do Risco em Mercados Competitivos de Electricidade: Previsão de Preços e Optimização do Portfolio de Contratos”, Tese de Doutoramento, Universidade de Trás-os-Montes e Alto-Douro, 2007.
- [17] S. J. Deng e S. S. Oren, “Electricity derivatives and risk management”, *Energy*, 2006.
- [18] ERSE, (2019, agosto). Funcionamento do Mercado a Prazo. [Online]. Disponível em: <http://www.erse.pt/pt/supervisaodemercados/mercadodeelectricidade/mercadoaprazo/Paginas/default.aspx>.
- [19] J. Marques, “Mercados Liberalizados de Energia Elétrica: Contratos Padronizados de Futuros”, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa, 2018.
- [20] F. Sousa, “Comercialização Bilateral de Energia em Mercados Liberalizados : Contratos por Diferenças e Gestão de Risco”, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2014.
- [21] D. Kirschen e G. Strbac, *Fundamentals of Power System Economics*. 2005.

- [22] A. Hadi, “Contratos Bilaterais em Mercados de Energia Eléctrica : O Contrato Forward com Contingências”, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa, 2016.
- [23] S. El Khatib e F. D. Galiana, “Negotiating bilateral contracts in electricity markets”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, n. 2, pp. 553–562, 2007.
- [24] B. Pereira, “Contratos Bilaterais em Mercados Multi-Agente de Energia Eléctrica : Protocolo de Ofertas Alternadas”, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2011.
- [25] J. Damião, “Análise do Mercado de Serviços de Regulação de Frequência Secundária e Terciária no Sistema Eléctrico Português”, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2015.
- [26] J. P. S. Paiva, *Redes de Energia Eléctrica - Uma Análise Sistemática*, 4^a Edição. IST Press, 2015.
- [27] ERSE, “Manual de Procedimentos da Gestão Global do Sistema do Setor Eléctrico”, 2014.
- [28] CNE e ERSE, “Breve comparação dos sistemas eléctricos de Espanha e Portugal”, 2002.
- [29] H. Rassid, “Mercado de Reservas: Simulador Multiagente SIMREEL e Caso de Estudo Envolvendo o Mercado Ibérico”, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa, 2017.
- [30] ENTSO-E, “P1: Load-Frequency Control and Performance”, 2009.
- [31] M. Borges, “Comercialização de Energia Eólica no Mercado Diário e de Reservas: Estratégias de Licitação e Penalizações”, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa, 2018.
- [32] M. Milligan *et al.*, “Operating Reserves and Wind Power Integration: An International Comparison”, *9th Annual International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems*, n. October 2010, pp. 1–19, 2010.
- [33] REN, (2019, julho). *MIBEL*. [Online]. Disponível em: <http://www.mercado.ren.pt/PT/Electr/InfoMercado/InfOp/MercOmel/Paginas/default.aspx>.
- [34] ERSE, (2019, agosto). *Funcionamento do Mercado Diário e Intradiário*. [Online]. Disponível em: <http://www.erse.pt/pt/supervisaodemercados/mercadodeeletricidade/mercadodiario/Paginas/default.aspx>.
- [35] ERSE, (2019, agosto). *Descrição do Mercado Grossista de Electricidade*. [Online]. Disponível em: <http://www.erse.pt/pt/supervisaodemercados/mercadodeeletricidade/Paginas/default.aspx>.

- [36] A. Martins, “Mercado Ibérico de Electricidade Simulação de um Modelo em Concorrência Perfeita”, Faculdade de Economia, Universidade do Porto, 2009.
- [37] Conselho de Reguladores do MIBEL, (2019, agosto). *Descrição do Funcionamento do MIBEL*. [Online]. Disponível em: http://www.erse.pt/pt/mibel/conse-lhodereguladores/Documents/Estudo_MIBEL_PT.pdf.
- [38] D. Vidigal, “Comercialização de Energia em Mercados em Bolsa : Simulador Multi-agente e Análise do Impacto da Geração Variável nos Preços Diários”, Tese de Mestrado, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2015.
- [39] M. Wooldridge e N. R. Jennings, “Intelligent agents: Theory and practice”, *The Knowledge Engineering Review*, vol. 10, n. 2, pp. 115–152, 1995.
- [40] JADE, (2019, agosto). “JAVA Agent DEvelopment Framework”. [Online]. Disponível em: <https://jade.tilab.com/>.
- [41] F. Bellifemine, G. Caire, e D. Greenwood, *Developing Multi-Agent Systems with JADE*. 2007.
- [42] N. Collier, “RePast : An Extensible Framework for Agent Simulation”, *The University of Chicagos Social Science Research*, vol. 36, pp. 371–375, 2003.
- [43] M. J. North, N. T. Collier, e J. R. Vos, “Experiences creating three implementations of the repast agent modeling toolkit”, *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 2006.
- [44] D. L. Martin, A. J. Cheyer, e D. B. Moran, *The open agent architecture: a framework for building distributed software systems*, vol. 13, n. 1–2. 1999.
- [45] Z. Zhou, W. K. Chan, e J. H. Chow, “Agent-based simulation of electricity markets: A survey of tools”, *Artificial Intelligence Review*, vol. 28, n. 4, pp. 305–342, 2007.
- [46] P. Marques, “Simulador multi-agente para o mercado eléctrico”, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2008.
- [47] L. Ramos, “A gestão do risco associado à negociação de energia eléctrica através de contratos bilaterais e mercado spot.”, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2011.
- [48] I. Praça, C. Ramos, Z. Vale, e M. Cordeiro, “Mascem: A Multiagent System that Simulates Competitive Electricity Markets”, *IEEE Intelligent Systems*, vol. 18, n. 6, pp. 54–60, 2003.
- [49] G. Santos, T. Pinto, Z. Vale, I. Praca, e H. Morais, “Virtual Power Players Internal Negotiation and Management in MASCEM”, em *Proceedings of 7th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems*, 2013.

[50] C. Rodrigues, “Impacto da incerteza da Previsão na produção de Energia Eólica e do fecho do mercado diário sobre os preços da Energia”, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2017.

[51] D. Rebelo, “Análise da Influência da Produção Eólica sobre os Preços do Mercado Ibérico de Eletricidade”, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa, 2019.

[52] F. Rodrigues, H. Algarvio, F. Lopes, A. Pronto, e J. Santana, “Potential Impact of Load Curtailment on the Day-Ahead Iberian Market: A Preliminary Analysis”, em *Communications in Computer and Information Science*, 2019, pp. 211–218.

[53] D. Proença, “Negociação de um novo Contrato para a Biblioteca da FCT através de Gestão Dinâmica de Preço e Quantidade de Energia”, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa, 2019.

Anexo A

Tabela A.1 – Resultados obtidos nos cenários C e D

Hora	Cenários (€/MWh)						
	A	C1	C3	C5	D1	D3	D5
00	97,70	97,1	95,5	90	97,7	97,7	97,7
01	85,03	85,03	85,03	85,03	85,03	85,03	85,03
02	79,58	79,58	79,58	79,58	79,58	79,58	79,58
03	76,80	76,8	76,8	76,8	76,8	76,8	76,8
04	75,25	75,25	75,25	75,25	75,25	75,25	75,25
05	76,10	76,1	76,1	76,1	76,1	76,1	76,1
06	80,10	80,1	80,1	80,1	80,1	80,1	80,1
07	94,00	90	90	85	94	94	94
08	98,01	97,2	95	90	98,01	98,01	98,01
09	98,61	98,19	96,5	95	98,61	98,61	98,61
10	98,61	98,19	96,5	95	98,61	98,61	98,61
11	97,35	96,5	95	85	97,35	97,35	97,35
12	96,50	95	90	85	96,5	96,5	96,5
13	96,00	95	90	85	96	96	96
14	89,23	89,23	89,23	89,23	89,23	89,23	89,23
15	88,00	88	88	88	88	88	88
16	86,75	86,75	86,75	86,75	86,75	86,75	86,75
17	93,21	90	85	85	93,21	93,21	93,21
18	99,18	98,61	97,7	95,65	99,18	99,18	99,18
19	101,70	101	99,6	98,61	101	99,6	98,61
20	101,99	101,99	100,67	99,28	101,99	100,67	99,28
21	100,67	100,2	99,18	98,2	100,2	99,18	98,2
22	99,18	98,61	97,7	96,19	99,18	99,18	99,18
23	96,19	95	95	95	96,19	96,19	96,19

Anexo B

Tabela B.1 – Dados das centrais do participante EDP

Hora	Participante EDP – <i>Hydro 1</i>		Participante EDP – <i>Hydro 4,6,7 e 8</i>	
	Potência (MW)	Preços (€/MWh)	Potência (MW)	Preços (€/MWh)
00	81,00	3,39	0,00	0,00
01	0,00	0,00	0,00	0,00
02	0,00	0,00	0,00	0,00
03	0,00	0,00	0,00	0,00
04	0,00	0,00	0,00	0,00
05	0,00	0,00	0,00	0,00
06	192,30	5,19	0,00	0,00
07	116,20	10,12	0,00	0,00
08	81,00	14,88	0,00	0,00
09	81,00	12,80	0,00	0,00
10	81,00	6,76	0,00	0,00
11	81,00	13,81	0,00	0,00
12	81,00	8,78	0,00	0,00
13	81,00	13,23	0,00	0,00
14	81,00	11,53	0,00	0,00
15	150,90	12,34	0,00	0,00
16	182,20	6,85	0,00	0,00
17	82,20	11,40	0,00	0,00
18	120,10	23,94	0,00	0,00
19	81,00	15,69	0,00	0,00
20	81,00	21,81	0,00	0,00
21	81,00	20,56	0,00	0,00
22	81,00	15,29	0,00	0,00
23	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela B.2 – Dados das centrais do participante EDP

Hora	Participante EDP – <i>Hydro 5</i>		Participante EDP – <i>Thermal 4</i>	
	Potência (MW)	Preços (€/MWh)	Potência (MW)	Preços (€/MWh)
00	88,40	5,07	139,00	5,96
01	88,40	6,39	139,00	9,72
02	288,40	3,57	0,00	0,00
03	288,40	8,84	0,00	0,00
04	288,40	3,03	0,00	0,00
05	88,40	2,19	91,70	9,80
06	88,40	8,74	139,00	9,79
07	88,40	10,25	139,00	14,82
08	88,40	5,20	139,00	6,02
09	88,40	7,84	139,00	12,06
10	88,40	10,56	139,00	10,36
11	88,40	9,35	139,00	8,85
12	88,40	12,78	139,00	13,59
13	88,40	13,58	139,00	12,97
14	88,40	13,41	139,00	7,28
15	88,40	12,54	139,00	7,91
16	88,40	11,41	139,00	13,34
17	88,40	11,58	139,00	13,63
18	88,40	23,42	139,00	23,56
19	88,40	17,08	139,00	24,33
20	88,40	21,89	139,00	21,11
21	88,40	22,19	139,00	22,42
22	88,40	23,36	139,00	24,45
23	88,40	20,46	139,00	24,53

Tabela B.3 – Dados das centrais do participante EDP

Participante EDP – <i>Thermal 5</i>					
Hora	Potência (MW)	Preços (€/MWh)	Hora	Potência (MW)	Preços (€/MWh)
00	109,00	5,02	12	109,00	7,39
01	109,00	4,04	13	109,00	7,59
02	0,00	0,00	14	109,00	9,31
03	0,00	0,00	15	109,00	13,93
04	0,00	0,00	16	109,00	7,81
05	0,00	0,00	17	109,00	6,36
06	109,00	8,55	18	109,00	18,72
07	109,00	11,19	19	109,00	21,20
08	109,00	10,57	20	109,00	21,47
09	109,00	8,98	21	109,00	17,00
10	109,00	6,83	22	109,00	21,74
11	109,00	5,77	23	109,00	18,25

Tabela B.4 – Necessidades do sistema

Hora	Potência (MW)		Hora	Potência (MW)	
	Descer	Subir		Descer	Subir
00	-145,0	290,0	12	-130,0	261,0
01	-135,0	271,0	13	-131,0	263,0
02	-124,0	248,0	14	-133,0	266,0
03	-109,0	218,0	15	-124,0	249,0
04	-103,0	206,0	16	-123,0	246,0
05	-94,0	108,0	17	-125,0	251,0
06	-109,0	219,0	18	-142,0	284,0
07	-124,0	248,0	19	-153,0	307,0
08	-147,0	294,0	20	-125,0	250,0
09	-132,0	264,0	21	-134,0	268,0
10	-136,0	273,0	22	-127,0	254,0
11	-126,0	252,0	23	-171,0	342,0

Tabela B.5 – Resultados do mercado sem os participantes “fixos”

Hora	Potência (MW)		Preço (€/MWh)	Hora	Potência (MW)		Preço (€/MWh)
	Descer	Subir			Descer	Subir	
00	-95,00	278,40	5,07	12	-130,00	261,00	12,78
01	-135,00	271,00	9,72	13	-131,00	263,00	13,23
02	-124,00	248,00	3,57	14	-133,00	266,00	11,53
03	-109,00	218,00	8,84	15	-124,00	249,00	12,34
04	-103,00	206,00	3,03	16	-123,00	246,00	7,81
05	-44,20	180,10	9,80	17	-125,00	251,00	11,58
06	-109,00	219,00	8,55	18	-142,00	284,00	23,56
07	-124,00	248,00	11,19	19	-153,00	307,00	24,33
08	-147,00	294,00	10,57	20	-69,50	248,00	21,47
09	-132,00	264,00	12,06	21	-95,00	278,40	22,19
10	-136,00	273,00	10,36	22	-127,00	254,00	23,36
11	-54,50	248,00	8,85	23	-98,70	336,40	24,53

Anexo C

Tabela C.1 – Dados das centrais do participante EDP

Hora	Participante EDP – <i>Thermal 6</i>		Participante EDP – <i>Thermal 7</i>	
	Potência (MW)	Preços (€/MWh)	Potência (MW)	Preços (€/MWh)
00	181,00	60,30	-242,00	26,70
01	181,00	60,30	-242,00	26,70
02	295,00	60,30	295,00	52,44
03	295,00	60,30	295,00	52,44
04	295,00	60,30	295,00	52,44
05	295,00	60,30	295,00	52,44
06	181,00	60,30	-242,00	26,70
07	181,00	60,30	-242,00	26,70
08	181,00	60,30	-242,00	26,70
09	181,00	60,30	-242,00	26,70
10	181,00	60,30	-242,00	26,70
11	181,00	60,30	-242,00	26,70
12	181,00	60,30	-242,00	26,70
13	181,00	60,30	-242,00	26,70
14	181,00	60,30	-242,00	26,70
15	181,00	60,30	-242,00	26,70
16	181,00	60,30	-242,00	26,70
17	181,00	60,30	-242,00	26,70
18	181,00	60,30	-242,00	26,70
19	181,00	60,30	-242,00	26,70
20	181,00	60,30	-242,00	26,70
21	181,00	60,30	-242,00	26,70
22	181,00	60,30	-242,00	26,70
23	181,00	60,30	-242,00	26,70

Tabela C.2 – Dados das centrais do participante EDP

Hora	Participante EDP – <i>Hydro 2</i>		Participante EDP – <i>Hydro 3</i>	
	Potência (MW)	Preços (€/MWh)	Potência (MW)	Preços (€/MWh)
00	406,20	58,68	306,60	70,04
01	406,20	58,68	306,60	70,04
02	406,20	58,68	306,60	70,04
03	406,20	58,68	306,60	70,04
04	406,20	58,68	306,60	70,04
05	406,20	58,68	306,60	70,04
06	406,20	58,68	306,60	70,04
07	406,20	58,68	306,60	70,04
08	406,20	58,68	306,60	70,04
09	-400,00	38,14	306,60	70,04
10	406,20	58,68	306,60	70,04
11	406,20	58,68	306,60	70,04
12	406,20	58,68	306,60	70,04
13	406,20	58,68	306,60	70,04
14	406,20	58,68	306,60	70,04
15	406,20	58,68	306,60	70,04
16	406,20	58,68	306,60	70,04
17	406,20	58,68	306,60	70,04
18	406,20	58,68	306,60	70,04
19	406,20	58,68	306,60	70,04
20	-400,00	38,14	306,60	70,04
21	-400,00	38,14	-298,00	35,76
22	-400,00	38,14	306,60	70,04
23	406,20	58,68	306,60	70,04

Tabela C.3 – Necessidades do sistema







Hora	Potência (MW)		Hora	Potência (MW)	
	Descer	Subir		Descer	Subir
00	-612,70	0,00	12	-134,22	0,00
01	-127,00	158,11	13	0,00	203,89
02	-631,30	4,56	14	0,00	870,56
03	-24,20	0,00	15	0,00	1194,67
04	-73,30	0,00	16	0,00	1392,89
05	-355,20	0,00	17	0,00	1300,89
06	-450,10	0,00	18	0,00	1435,11
07	-171,30	0,00	19	0,00	1551,89
08	-941,70	0,00	20	0,00	687,89
09	-1111,67	0,00	21	-115,44	0,00
10	-804,67	0,00	22	0,00	219,56
11	-128,33	0,00	23	0,00	226,22

Tabela C.4 – Resultados do mercado sem os participantes “fixos”

Hora	Energia a Subir (MWh)	Preço (€/MWh)	Energia a Descer (MWh)	Preço (€/MWh)
00	0,00	0,00	-303,40	26,70
01	158,10	58,68	-127,00	26,70
02	0,00	0,00	-63,10	0,00
03	4,60	52,44	-2,40	0,00
04	0,00	0,00	-7,40	0,00
05	0,00	0,00	-35,50	0,00
06	0,00	0,00	-287,00	26,70
07	0,00	0,00	-171,30	26,70
08	0,00	0,00	-336,20	26,70
09	0,00	0,00	-753,20	26,70
10	0,00	0,00	-322,50	26,70
11	0,00	0,00	-128,40	26,70
12	0,00	0,00	-134,20	26,70
13	203,90	58,68	0,00	0,00
14	870,50	70,04	0,00	0,00
15	1013,30	70,04	0,00	0,00
16	1023,90	70,04	0,00	0,00
17	1033,00	70,04	0,00	0,00
18	1037,30	70,04	0,00	0,00
19	1049,00	70,04	0,00	0,00
20	556,40	70,04	0,00	0,00
21	0,00	0,00	-115,50	38,14
22	219,50	70,04	0,00	0,00
23	226,30	58,68	0,00	0,00

Anexo D

Tabela D.1 – Resultados da simulação de um novo contrato bilateral

Iteração	Retalhista	Consumidor		Descrição
1	Preço 1: 62,08 €/MWh Preço 2: 58,35 €/MWh Preço 3: 52,09 €/MWh Preço 4: 46,08 €/MWh			O retalhista envia a proposta inicial
2		Preço 1: 58,75 €/MWh Preço 2: 55,22 €/MWh Preço 3: 49,29 €/MWh Preço 4: 43,57 €/MWh	Volume 1: 319,33 kWh Volume 2: 906,42 kWh Volume 3: 77,04 kWh Volume 4: 4,48 kWh	O consumidor envia a proposta inicial
3	Preço 1: 61,32 €/MWh Preço 2: 57,52 €/MWh Preço 3: 51,45 €/MWh Preço 4: 45,51 €/MWh			O retalhista envia uma contraproposta
4		Preço 1: 59,66 €/MWh Preço 2: 56,07 €/MWh Preço 3: 50,05 €/MWh Preço 4: 44,24 €/MWh	Volume 1: 305,98 kWh Volume 2: 859,11 kWh Volume 3: 60,02 kWh Volume 4: 4,48 kWh	O consumidor envia uma contraproposta
5	Preço 1: 60,75 €/MWh Preço 2: 56,91 €/MWh Preço 3: 50,98 €/MWh Preço 4: 45,08 €/MWh			O retalhista envia uma contraproposta
6		Preço 1: 60,34 €/MWh Preço 2: 56,71 €/MWh Preço 3: 50,62 €/MWh Preço 4: 44,75 €/MWh	Volume 1: 292,55 kWh Volume 2: 828,91 kWh Volume 3: 32,74 kWh Volume 4: 4,48 kWh	O consumidor envia uma contraproposta
Acordo Final	Preço 1: 60,34 €/MWh Preço 2: 56,71 €/MWh Preço 3: 50,62 €/MWh Preço 4: 44,75 €/MWh	Volume 1: 292,55 kWh Volume 2: 828,91 kWh Volume 3: 32,74 kWh Volume 4: 4,48 kWh		O retalhista aceita a proposta do consumidor